

R 1892.3A

waterloopkundig laboratorium
delft hydraulics laboratory

Flakkeese spuisluis

prototypemetingen

tekst en bijlagen

verslag onderzoek

R1892-III band A

maart 1984

Flakkeese spuisluis

prototypemetingen

tekst en bijlagen

verslag onderzoek

R1892-III band A

maart 1984

INHOUD

Lijst van tabellen

Lijst van figuren

Lijst van symbolen

		blz.
<u>1</u>	<u>Inleiding.....</u>	1
1.1	Opdracht.....	1
1.2	Probleemstelling.....	1
1.3	Relatie tot overig onderzoek.....	2
1.4	Samenvatting en voornaamste konklusies.....	4
<u>2</u>	<u>Doel en opzet prototypemetingen.....</u>	12
2.0	Algemeen.....	12
2.1	Gegevens nodig voor toekomstig beheer.....	13
2.2	Gegevens nodig voor verifikatie modelonderzoek.....	14
2.3	Gegevens nodig voor toekomstig ontwerp.....	14
2.4	Gemeten parameters en wijze van meten.....	15
2.5	Wijze van registratie van de meetgegevens.....	19
<u>3</u>	<u>Te onderzoeken relaties.....</u>	20
3.0	Algemeen.....	20
3.1	Relaties voor het beheer.....	20
3.1.1	Volledig aangeslagen.....	20
3.1.1.1	Afvoerkapaciteit.....	20
3.1.1.2	Energieverliezen.....	22
3.1.2	Aanslaan.....	25
3.1.2.1	Tijdsduur van aanslaan met de vakuumpomp.....	25
3.1.2.2	Tijdsduur van zelf aanslaan.....	26
3.1.2.3	Luchtpompkapaciteit.....	27
3.1.3	Afslaan.....	30
3.1.3.0	Algemeen.....	30
3.1.3.1	Tijdsduur van afslaan.....	31
3.1.3.2	Grootte van beluchtingsopeningen.....	31
3.2	Relaties voor verifikatie modelonderzoek.....	32
3.2.0	Algemeen.....	32

INHOUD (vervolg)

	blz.
3.2.1	Luchttransporterend vermogen bij stationaire stroming..... 32
3.2.2	Aanslaan..... 33
3.2.3	Afslaan..... 33
3.3	Relaties voor toekomstig ontwerp..... 33
3.3.1	Luchttransporterend vermogen in stationaire situatie..... 33
3.3.2	Aanslaan..... 35
3.3.3	Afslaan..... 36
<u>4</u>	<u>Verloop van het uitgevoerde onderzoek..... 37</u>
4.0	Algemeen..... 37
4.1	Uitvoering prototypeproeven..... 38
4.2	Luchtinsluiting..... 39
4.3	Weersomstandigheden..... 40
<u>5</u>	<u>Resultaten van de prototypeproeven..... 42</u>
5.0	Algemeen..... 42
5.1	Resultaten van belang voor het beheer..... 42
5.1.0	Algemeen..... 42
5.1.1	Volledig aangeslagen..... 42
5.1.1.1	Afvoerkapaciteit..... 42
5.1.1.2	Energieverliezen..... 49
5.1.1.3	Relatie afvoer door koker 2 en die door de overige kokers..... 55
5.1.1.4	Nauwkeurigheid debietmeting..... 57
5.1.2	Aanslaan..... 59
5.1.2.1	Tijdsduur van aanslaan met de vakuumpomp..... 59
5.1.2.2	Tijdsduur van zelf aanslaan..... 60
5.1.2.3	Luchtpompkapaciteit..... 61
5.1.3	Afslaan..... 62
5.1.3.1	Tijdsduur van afslaan en grootte van beluchtingsopening bij afsluiter A..... 62
5.1.3.2	Tijdsduur van afslaan en grootte van beluchtingsopening bij afsluiter B..... 63
5.1.3.3	Maximum verval waarbij kan worden afgeslagen..... 64

INHOUD (vervolg)

	blz.	
5.2	Resultaten van belang voor verifikatie modelonderzoek.....	64
5.2.0	Algemeen.....	64
5.2.1	Volledig aangeslagen.....	65
5.2.1.1	Afvoerkapaciteit.....	65
5.2.1.2	Energieverliezen.....	66
5.2.2	Aanslaan.....	66
5.2.2.1	Aanslaan met de vakuumpomp.....	66
5.2.2.2	Zelf aanslaan.....	66
5.2.3	Afslaan.....	66
5.2.4	Stationaire stroming.....	67
5.3	Resultaten van belang voor toekomstig beheer.....	68
5.3.0	Algemeen.....	68
5.3.1	Aanslaan met vakuumpomp.....	68
5.3.2	Zelf aanslaan.....	71
5.3.3	Stationaire stroming.....	72
5.3.3.0	Algemeen.....	72
5.3.3.1	Bepaling van de snelheid v_b	73
5.3.3.2	Luchttransportkapaciteit.....	75

LITERATUUR

BIJLAGEN

1. Overzicht geregistreeerde parameters
2. Overzicht van in modelonderzoek onderzocht relaties
3. Overzicht op te stellen relaties
4. Wiskundige beschrijving luchttransport
5. Luchtdebietformules van Thomas en Ervine
6. Bepaling van de insluitsnelheid v_b
7. Debietbepaling: ijking van de Ottmolen
8. Berekening gatdiameters van de flens voor de beluchtungsafsluiters
9. Proevenoverzicht

Lijst van tabellen

1. Stationaire proeven met 1 hevel
2. Stationaire proeven met 3 hevels
3. Stationaire proeven met 6 hevels
4. Proeven met volledig aangeslagen situatie met 1 hevel
5. Proeven met volledig aangeslagen situatie met 3 hevels
6. Proeven met volledig aangeslagen situatie met 6 hevels
7. Aanslagproeven
8. Afslagproeven
9. Zelf aanslaanproef
10. Energieverliescoëfficiënten
11. Aanslagtijden
12. De h_a als functie van ΔH en h_1 bij $p_{12} = 5$ mmwk
13. Aanslaan: luchtpompcapaciteit
14. Afslagtijden
15. Zelf aanslaantijden
16. Zelf aanslaan luchtdebieten
17. Luchttransport stationaire proeven 1 hevel
18. Luchttransport stationaire proeven 3 hevels
19. Luchttransport stationaire proeven 6 hevels
20. Invloed debietvariatie op de v_b
21. Invloed variatie verliescoëfficiënt ξ_t op de v_b
22. Invloed variatie h_a op de v_b
23. Invloed variatie verliescoëfficiënt ξ_{14-3} op de v_b

Lijst van figuren

1. Positie meetpunten van de diverse parameters
2. Luchtdebietmeting
3. Fout in luchtdebietmeting bij wind
4. Positie waterspiegels bij stationaire stroming (uit model)
5. Volume luchtkamer als functie van ΔH en h_a voor stationaire stroming
6. IJkgrafiek luchtpompen
7. Luchtdebieten, m' als functie van h_a
8. Luchtdebieten, α_c als functie van h_a
9. Luchtdebieten, α_E als functie van v_o en F_r
10. Verloop van d_b als functie van ΔH en h_a (uit model)
11. $Q-\Delta H_{1-3}$ relatie voor 1 hevel volledig aangeslagen
12. $Q-\Delta H_{1-3}$ relatie voor 2 hevels volledig aangeslagen
13. $Q-\Delta H_{1-3}$ relatie voor 3 hevels volledig aangeslagen
14. $Q-\Delta H_{1-3}$ relatie voor 6 hevels volledig aangeslagen
15. Vergelijking $Q-\Delta H_{1-3}$ relaties voor verschillende aantallen hevels
16. $\Delta H_{1-3}-\Delta H_{2-4}$ relatie voor 1 hevel (Delta H van Histospalen en borrelbuizen) volledig aangeslagen
17. $\Delta H_{1-3}-\Delta H_{2-4}$ relatie voor 3 hevels (Delta H van Histospalen en Borrelbuizen) volledig aangeslagen
18. $\Delta H_{1-3}-\Delta H_{2-4}$ relatie voor 6 hevels (Delta H van Histospalen en borrelbuizen) volledig aangeslagen
19. $Q-\Delta H_{2-4}$ relatie voor 1 hevel (Debiet-Delta H (borrelbuizen)) volledig aangeslagen
20. $Q-\Delta H_{2-4}$ relatie voor 3 hevels (Debiet-Delta H (borrelbuizen)) volledig aangeslagen
21. $Q-\Delta H_{2-4}$ relatie voor 6 hevels (Debiet-Delta H (borrelbuizen)) volledig aangeslagen
22. Vergelijking $Q-\Delta H_{2-4}$ relaties voor verschillende aantallen hevels
23. $p_{12}-Q$ voor 1 hevel (Druk in de kroon (($p(\text{abs})-H_1+h_a-p(\text{atm})$)-Debiet) volledig aangeslagen
24. $p_{12}-Q$ voor 3 hevels (Druk in de kroon (($p(\text{abs})-H_1+h_a-p(\text{atm})$)-Debiet) volledig aangeslagen
25. $p_{12}-Q$ voor 6 hevels (Druk in de kroon (($p(\text{abs})-H_1+h_a-p(\text{atm})$)-Debiet) volledig aangeslagen

Lijst van figuren (vervolg)

26. $p_{12}^{-\Delta H}$ voor 1 hevel (Druk in de kroon-Delta H) volledig aangeslagen
27. $p_{12}^{-\Delta H}$ voor 3 hevels (Druk in de kroon-Delta H) volledig aangeslagen
28. $p_{12}^{-\Delta H}$ voor 6 hevels (Druk in de kroon-Delta H) volledig aangeslagen
29. $\xi_{\text{tot}}^{-\Delta H}$ voor 1, 3 en 6 hevels (KSI(tot) - ΔH) volledig aangeslagen
30. $\xi_{1-11}^{-\Delta H}$ voor 1, 3 en 6 hevels (KSI(1-11) - ΔH) volledig aangeslagen
31. $\xi_{14-3}^{-\Delta H}$ voor 1, 3 en 6 hevels (KSI(14-3) - ΔH) volledig aangeslagen
32. Aanslagtijd als functie van ΔH en aantal pompen
33. p_{12} , h_a en h_b als functie van de tijd voor 1 pomp en 1 hevel bij aanslaan
34. p_{12} , h_a en h_b als functie van de tijd voor 2 pompen en 3 hevels bij aanslaan
35. p_{12} , h_a en h_b als functie van de tijd voor 3 pompen en 6 hevel bij aanslaan
36. p_{12} als functie van de waterstand in het bovenbeen bij aanslaan van 1 hevel met 1 pomp
37. p_{12} als functie van de waterstand in het bovenbeen bij aanslaan van 3 hevels met 2 pompen
38. p_{12} als functie van de waterstand in het bovenbeen bij aanslaan van 6 hevels met 3 pompen
39. Tijden van zelf aanslaan als functie van ΔH en h_a
40. Capaciteit luchtpompen: IJkgrafiek en effectieve capaciteiten als functie van de druk
41. Druk in de hevelkroon en druk in de vakuumentank als functie van de tijd bij aanslaan 1 hevel met 1 pomp
42. Druk in de hevelkroon en druk in de vakuumentank als functie van de tijd bij aanslaan 2 hevels met 1 pomp
43. Druk in de hevelkroon en druk in de vakuumentank als functie van de tijd bij aanslaan 6 hevel met 3 pompen
44. Afslagtijden als functie van ΔH en grootte van de opening van de beluchtingsafsluiter
45. Afslaan via afsluiter A: Druk in de kroon en luchtdebiet als functie van tijd bij $\Delta H \approx 0$
46. Afslaan via afsluiter A: Druk in de kroon en luchtdebiet als functie van tijd bij $\Delta H \approx 0,70$ m

Lijst van figuren (vervolg)

47. Afslaan via afsluiter B: Druk in de kroon en luchtdebiet als functie van tijd bij $\Delta H \approx 0$
48. Afslaan via combinatie afsluiter A en B: Druk in de kroon en luchtdebiet als functie van tijd bij $\Delta H \approx 0,70$
49. Vergelijking $Q-\Delta H$ relatie, model en prototype
50. Vergelijking $Q-h_a$ relatie bij diverse ΔH , model en prototype
51. Vergelijking Q_L-h_a relatie, bij diverse ΔH , extrapolatie model en prototype
52. Relatie Q_L-Q_w prototype bij diverse ΔH
53. Wateroppervlak $A(y)$ als functie van ΔH en h_a (of y)
54. Relatie Q_w-h_a bij verschillende waarden van ΔH (uit model)

Lijst van symbolen

A(y)	oppervlakte van de waterspiegel	m^2
A_L	grootte luchtopening (van vlinderklep c.q. membraanafsluiter)	m^2
b	breedte (en hoogte) van de hevelkoker	m
C	konstante	-
D	kokerhoogte (= b)	m
g	versnelling van de zwaartekracht	m/s^2
H_1	energiehoogte op positie 1	m
ΔH	energieverlies over totale konstruktie	m
ΔH_{1-3}	energieverlies over traject 1-3	m
ΔH_{a-b}	energieverlies in de kroon bij niet volledig aangeslagen hevel	m
h_2	waterstand op positie 2	m
h_a, h_b	waterstand in boven-, benedenbeen	m
K	kapaciteit van de luchtpomp (theoretisch)	m^3/s
K_e	effektieve capaciteit van de luchtpomp (daadwerkelijk uit de kroon verwijderd)	m^3/s
K, k	konstante	-
m'	konstante in luchtdebietformule	-
N	atmosferische luchtdruk in mwk	m
O	aantal omwentelingen	-
P	druk in N/m^2	N/m^2
P_{12}	druk in positie 12 (de kroon)	mwk
pn	piëzometrisch niveau	m
T	tijdsduur	s
t	tijdstip	s
Q, Q_w	waterdebiet	m^3/s
Q_L	luchtdebiet	m^3/s
Vol, V	volume luchtkamer	m^3
v_o	gemiddelde snelheid in gevulde kokerdelen	m/s
v_b	snelheid op insluitpunt	m/s
v_c	minimale snelheid voor luchtinsluiting	m/s
v_r	minimale snelheid voor luchttransport	m/s
y	waterstand (afstand tot waterspiegel op tijdstip $t=0$)	m
z_2	plaatshoogte op positie 2	m
z	$h_b - h_c$ (zie fig. 3.13)	m

Lijst van symbolen (vervolg)

α	hellingshoek	o
a_c	koëfficiënt in luchtdebietformule	-
α_E	koëfficiënt in luchtdebietformule	-
β	koëfficiënt in luchtdebietformule	-
ξ_{2-4}	verlieskoëfficiënt over traject 2-4 etc.	-
ρ	s.m. water	kg/m ³
ρ_L	s.m. lucht	kg/m ³

De bijschriften bij diverse figuren zijn door de computer verzorgd, daarom was het nodig deze aan te passen:

ΔH	= DELTA H
ξ	= KSI
P_{12}	= p(abs)
ΔH_{1-3}	= DELTA H (Histospalen)
ΔH_{2-4}	= DELTA H (borrelbuizen)

Voor nummering van de diverse posities, zie figuur 1.

Figuren aangeduid met één getal zijn afzonderlijk opgenomen, met twee getallen zijn in de tekst opgenomen (bijvoorbeeld fig. 2.3 is de derde figuur uit hoofdstuk 2).

Figuurnummers met een B verwijzen naar een bijlage.

Een lijst van symbolen gebruikt in de tabellen volgt hierna.

Lijst van symbolen gebruikt in de tabellen

H1	waterstand Grevelingen	m
H3	waterstand Krammer	m
H2	waterstand onmiddellijk bovenstrooms	m
H4	waterstand onmiddellijk benedenstrooms	m
dH1	verval H_1-H_3 (= DELTA H)	m
dH2	verval H_2-H_4	m
h_a	waterstand in bovenbeen	m
h_b	waterstand in benedenbeen	m
Q1	debiet door a.d.m. gemeten	m^3/s
Q2	debiet door OH-model gemeten	m^3/s
Pabs	druk in de kroon	mwk
Q-lu	luchtdebiet (van atmosferische druk)	m^3/s
Q-lu*	luchtdebiet (van de druk in de kroon)	m^3/s
Tijd	datum-tijdgroep	
	16:09:15:32:49 betekent: 16 september om 15 uur, 32 min. en 49 seconden	
KSI	verliescoëfficiënt	

berekeningsmethoden v_b en d_b volgens 5.3.3.1

KSI-tot	methode I
interpol	methode II
Hc en p12	methode IIIb
h_a en h_b	methode IV

1 Inleiding

1.1 Opdracht

Per brief (WT 421) van 22 februari 1983 heeft de Rijkswaterstaat Deltadienst aan het Waterloopkundig Laboratorium in Delft opgedragen prototypemetingen in de Flakkeese Spuisluis uit te voeren en de resultaten hiervan te analyseren.

De uitvoering van de prototypemetingen, die plaatsvonden in september en oktober 1983, geschiedde onder leiding van de heer P. Bosland.

De analyse en verslaggeving zijn verricht door ir. J. Uwland in de periode oktober-december 1983.

1.2 Probleemstelling

Om meerdere redenen is destijds door Rijkswaterstaat besloten tot het uitvoeren van prototypemetingen in de Flakkeese Spuisluis en wel om:

- A) Het vaststellen van aan- en afslagprocedures.
- B) Het leveren van gegevens nodig voor het toekomstig beheer ($Q-\Delta H$ relaties).
- C) Het verzamelen van gegevens waarmee de op modelonderzoek gebaseerde extrapolatietechnieken met betrekking tot luchttransport kunnen worden geverifieerd.

Gegevens die voor het beheer van groot belang zijn (A en B) dienden zo spoedig mogelijk na de metingen (die in september en oktober plaatsvonden) beschikbaar te zijn, opdat de beheerder in 1984 met zijn eigen onderzoeksprogramma starten kan.

In een voorstudie (notitie R 1892-I) [12] is aangegeven welke relaties tussen gemeten grootheden voor de beheerder van belang zijn. Deze zijn tussentijds gerapporteerd in notitie R 1892-II [13].

Voor zover de gegevens van C van minder belang zijn voor de beheerder, en dus nog niet eerder gerapporteerd zijn, behelzen deze vooral de luchttransportcapaciteit van stromend water.

De luchtafvoer in een stationaire situatie kan worden berekend met formules zoals opgesteld door Casteleyn [3], Thomas [4] en Ervine [5], [6]. Met de resultaten van de prototypemetingen dienen deze formules te worden gecontroleerd, waarbij zo mogelijk moet worden aangegeven welke formule het luchttransport het beste beschrijft.

Gebruik makend van deze formules kan verder een rekenmodelletje worden opgezet, waarmee het "zelfaanslaan" wordt beschreven. Het moet dan informatie over het (resterende) luchtvolume als functie van de tijd geven.

Ook voor het aanslaan van de hevel met een luchtpomp is een dergelijk rekenmodelletje bruikbaar; het zou dan een indruk van het volume lucht als functie van de luchtpompkapaciteit en de tijd moeten geven.

De volgende vragen worden in het voorliggende verslag behandeld:

a) Van belang voor het beheer:

- 1) Hoe groot is de afvoerkapaciteit van de hevel onder diverse omstandigheden ($Q-\Delta H$ relatie)?
- 2) Hoe lang duurt aanslaan en afslaan onder de verschillende omstandigheden?
- 3) Hoe verloopt de afslagprocedure?

b) Voor verificatie van modelonderzoek en mogelijk toekomstig ontwerp:

- 1) Hoe groot is de luchttransportkapaciteit van stromend water in een stationaire situatie?
- 2) Hoe is aanslaan te beschrijven (als functie van luchtpompkapaciteit en de tijd)?
- 3) Hoe is zelf aanslaan te beschrijven als functie van de tijd?

1.3 Relatie tot overig onderzoek

Door het Waterloopkundig Laboratorium is in het verleden al een aantal onderzoeken verricht, die betrekking hebben op de als hevel in de Grevelingendam uitgevoerde Flakkeese Spuisluis.

Als eerste studie is de toepasbaarheid van hevels in de primaire en secundaire dammen van het Deltaplan onderzocht: Hevels in het Deltagebied R806.

Het vooronderzoek van de hevel, dat vooral betrekking had op de situering van de negen kokers en de vormgeving van de in- en uitstroomkonstruktie resulteerde in een vijftal nota's M1331 I t/m V.

In "Stroombeeld en ontgrondingsonderzoek hevels in de Grevelingendam M1346 is de optimale uitstroomkonstruktie bepaald evenals de afmetingen van het stortebed.

Het modelonderzoek naar hydraulische verschijnselen vooral bij aan- en afslaan is gerapporteerd in "Hevels in de Grevelingendam", Verslag Modelonderzoek 1:20 (M1347) en "Hevels in de Grevelingendam" verslag Modelonderzoek 1:7 (M1348)". Omdat een aantal in de hevel optredende verschijnselen niet rechtstreeks naar prototypewaarden zijn te vertalen is in een tweetal modellen onderzoek verricht. De schaalafhankelijke modelgegevens zijn in een afzonderlijk verslag: "Hevels in de Grevelingendam", extrapolatieresultaten model 1:20 en model 1:7 (M1347-M1348) behandeld. Tevens is in dit verslag al de wenselijkheid aangegeven van een onderzoek in het prototype.

Een nader voorstel tot prototypemetingen is uitgewerkt in Hevels in de Grevelingendam, Nota Voorstel Prototypemetingen (M1347/M1348).

In het oorspronkelijke ontwerp, zoals onderzocht in bovenvermelde onderzoeken, zijn als gevolg van gewijzigde functies nogal wat veranderingen aangebracht. De konsekwenties van een aantal wijzigingen is in een notitie M 1359-06 beschreven.

De gevoeligheid voor dwarswind van de door het WL ontworpen inrichting voor het meten van luchtdebieten is beschreven in de notitie "Testen van gevoeligheid van geijkte inlaattuit voor dwarswind ten behoeve van prototypemetingen notitie R1517 (juli 1981)".

Om de metingen die in september 1983 plaatsvonden zo efficiënt mogelijk te kunnen laten verlopen, was tot een voorstudie (R1892.I) besloten, waarin hierboven (in 1.2) genoemde aspecten zijn behandeld.

Deze notitie R1892-I is in juni 1983 uitgebracht.

Gegevens die voor de beheerder van belang zijn, dienden zo spoedig mogelijk na afloop van de metingen beschikbaar te zijn. Om die reden zijn de betreffende aspecten tussentijds gerapporteerd in een notitie R 1892-II (november 1983).

De eigenlijke prototypemetingen worden in het onderhavige rapport R1892-III verslagen.

Als resultaat van overleg tussen diverse, bij de prototypemetingen betrokken instanties: RWS, Deltadienst, WT en W.W.O., Directie Bruggen, Directie Waterhuishouding en Waterbeweging (Hydro-Instrumentatie) en het Waterloopkundig Laboratorium geeft de RWS notitie DD. WWO 83-20.007 het draaiboek en de algemene omschrijving van de prototypemetingen in de Flakkeese Spuisluis.

1.4 Samenvatting en voornaamste konklusies

Per hoofdstuk wordt hieronder allereerst een samenvatting gegeven waarna de voornaamste konklusies worden vermeld.

Hoofdstuk 2. Doel en opzet prototypemeting

Als tweeledig doel van de metingen wordt vermeld: A) Het verzamelen van gegevens nodig voor het beheer zoals 1) aan- en afslagprocedures, 2) $(Q-\Delta H)$ relaties; B) Verzamelen van gegevens nodig voor verifikatie en extrapolatie van modelresultaten.

De onderzoeken hebben plaatsgevonden bij een vijftal stromingscondities te weten: aanslaan met de vakuumpomp, zelf aanslaan, afslaan, volledig aangeslagen, en bij stationaire stroming (een situatie waarbij via de beluchtingsvoorzieningen evenveel lucht wordt toegelaten dan door de stroming zelf wordt afgevoerd).

Deze laatste stromingswijze was voornamelijk voor B) van belang. Voor deze stromingscondities zijn achtereenvolgens voor het toekomstig beheer, voor de verifikatie van modelonderzoek en voor toekomstig ontwerp gegevens vermeld die bepaald dienen te worden.

Tenslotte is aangegeven op welke wijze deze zijn geregistreerd.

Hoofdstuk 3. Te onderzoeken relaties

Aan de hand van bijlage 2 en 3 wordt hier aangegeven welke relaties tussen de verschillende gemeten parameters moeten worden opgesteld.

Voor het toekomstige beheer zijn dit voor de volledig aangeslagen situatie: 1) de afvoerkapaciteit (de $Q-\Delta H$ -relatie), 2) energieverliezen over de diverse trajecten.

Voor aanslaan is vooral de tijdsduur van aanslaan gewenst zo ook bij zelf aanslaan.

Verder moet de luchtpompkapaciteit worden gecontroleerd.

Bij afslaan moet worden vastgesteld de tijdsduur van afslaan, evenals de grootte van de beluchtingsopeningen, voor de verschillende afsluiters. (Een bedrijfsafsluiter (A) en noodafsluiter (B).)

Als criterium geldt voor het afslaan dat dit "rustig" dient te geschieden. De waterspiegels in de hevelbenen mogen niet zo snel dalen, dat ze "doorschieten" onder het plafond en daardoor klappen kunnen uitoefenen.

Voor de verifikatie van modelonderzoek zijn behalve controle op afvoerkapaciteit en energieverliezen vooral de luchtaspecten belangrijk. Bij stationaire stroming moet de luchttransportkapaciteit worden bepaald: $(Q_L - Q_W)$ -relaties voor diverse ΔH 's.

Voor het toekomstig ontwerp is het allerbelangrijkste onderdeel weer het luchttransporterende vermogen bij stationaire stroming. Een vijftal formules die dit luchttransporterende vermogen zouden beschrijven als functie van de snelheid op het insluitpunt (v_b) moeten worden gecontroleerd met behulp van in diverse situaties gemeten luchtdebieten. Bijlage 6 beschrijft een aantal methodes voor de bepaling van v_b .

Voor aanslaan met de vakuumpomp en zelf aanslaan is een rekenprogramma opgesteld. Het rekenprogramma voor zelf aanslaan maakt gebruik van bovengenoemde luchtdebietformules en methodes voor de v_b bepaling.

Met deze programma's moet een aantal gemeten situaties worden nagerekend om een indruk te krijgen over de betrouwbaarheid ervan.

Hoofdstuk 4. Uitvoering prototypeproeven

In dit hoofdstuk wordt het verloop van de proeven beschreven. Om een aantal redenen, waarvan luchtinsluiting en slechte weersomstandigheden de voornaamste zijn is van de oorspronkelijke opzet [8] sterk afgeweken.

De oorzaken en de konsekwentie van luchtinsluiting en de gevolgen van de harde wind worden summier aangegeven.

Hoofdstuk 5. Resultaten van de prototypeproeven

Per onderdeel (t.w. van belang voor het beheer, voor modelverifikatie of voor toekomstig ontwerp) zijn in dit hoofdstuk de meetresultaten beschreven.

Resultaten van belang voor het beheer

Deze resultaten zijn al eerder tussentijds gerapporteerd in een notitie R1892-II omdat de beheerder in de oorspronkelijke opzet in een vroeg stadium behoefte zou hebben aan deze gegevens.

Voor de stationaire stromingssituatie zijn bepaald en weergegeven: de Q- ΔH -relaties voor één, drie en zes kokers in gebruik.

Het debiet is gerelateerd zowel aan het "theoretische" verval (het verschil in energieniveau's boven- en benedenstrooms (ΔH_{1-3}), als aan het verval over de konstruktie (verschil in waterstanden onmiddellijk boven- en benedenstrooms van de hevel (ΔH_{2-4}). Dit laatste verval wordt als enige in de beheerssituatie gemeten.

De Q- ΔH -relaties worden gegeven in de figuren 11 t/m 15 en 19 t/m 22. Het verschil in debiet gemeten in koker 2, bij overeenkomstig verval en verschillende aantallen kokers in werking, blijkt gering te zijn.

De energieverliescoëfficiënten en voor de gehele konstruktie en voor de diverse leidingtrajekten zijn zowel gemeten als berekend en worden gepresenteerd in figuur 29, 30 en 31 en in tabel 10 en 5.1. Uit tabel 5.1 blijkt een redelijke overeenkomst tussen de berekende en gemeten ξ -waarden; de afwijking van in model gemeten waarden is nogal groot. Oorzaken voor dit verschil worden aangegeven.

Omdat alleen in koker 2 gemeten is, is de verhouding tussen de debieten via koker 1 en 3 ten opzichte van dat door koker 2 van belang. Uit metingen in model en berekeningen blijkt deze verhouding ongeveer 1 te zijn.

De nauwkeurigheid, waarmee uiteindelijk de debieten in prototype gemeten zijn, is evenwel niet groot. Uit de beschouwing van paragraaf 5.1.14 moge blijken dat de onnauwkeurigheid zeker groter kan zijn dan 10%.

In figuur 32 en 39 worden de tijden van aanslaan met de vakuumpomp respectievelijk zelf aanslaan gegeven als funktie van het verval, en de verhouding aantal hevels-aantal pompen.

De berekende en "gemeten" effectieve luchtpompkapaciteiten komen goed overeen en zijn sterk afhankelijk van de verhouding aantal hevels-aantal pompen. In

tabel 13 zijn deze capaciteiten aangegeven evenals in figuur 40.

Voor zowel de bedrijfsafsluiter als de noodafsluiter zijn de gatdiameters van de flenzen bepaald na een aantal afslagproeven.

Tabel 14 geeft voor een aantal proeven de tijd waarin de hevels zijn afgeslagen. Er bestaat bij deze afsluiteropening geen gevaar voor ontoelaatbare dynamische verschijnselen.

Resultaten van belang voor verifikatie van modelonderzoek

De $Q-\Delta H$ -relatie bij volledig aangeslagen hevel voor de prototypesituatie wordt in figuur 49 met het modelresultaat vergeleken. Het debiet in het prototype is zeker 15% lager dan in model. Dit verschil is een gevolg van de afwijkende geometrie en de luchtinsluiting. Dit resulteerde uiteraard in verschillen tussen verliescoëfficiënten in model en prototype.

Een vergelijking bij Aanslaan en Afslaan van modelwaarden met waarden uit prototype is niet zo zinvol omdat de luchtpompkapaciteit in model niet gelijk was aan die in het prototype, evenmin het verlies in de afslagluchtleiding.

Voor de stationaire stroming werd geconstateerd dat de $Q-h_a$ relatie (voor diverse ΔH) in model en prototype zeer goed overeenkomen zoals uit figuur 50 blijkt.

Wel kunnen de debieten bij de prototypemetingen "overschat" zijn (als ingesloten lucht een rol speelt).

De gemeten luchtdebieten kunnen worden vergeleken met geëxtrapoleerde modelresultaten. Als extrapolatietechniek is hierbij de Casteleyn 2 formule gebruikt. Aan de hand van figuur 51 is de vergelijking mogelijk.

Bij een overeenkomstige ΔH is het maximum luchtdebiet in model gemeten als regel kleiner dan het door Casteleyn 2 voorspelde.

Voor kleinere waarden van h_a daarentegen (en identieke ΔH) wordt in prototype meer lucht afgevoerd dan door Casteleyn was voorspeld. Voor waarden van $\Delta H < 0,8$ is de situatie nogal onduidelijk.

Resultaten van belang voor toekomstig ontwerp

Voor het toekomstig ontwerp is het van groot belang dat de diverse situaties waarin luchttransport een rol speelt kunnen worden doorgerekend.

Een rekenmodel is ontwikkeld waarmee zowel aanslaan met de pomp, zelf aanslaan als stationaire stroming kunnen worden doorgerekend.

In bijlage 4 is dit programma beschreven en is tevens een stroomschema opgenomen.

Wat aanslaan betreft is de beschrijving van het proces met het rekenprogramma tot op het moment waarop de hevel gaat afvoeren korrekt. Vooral als gevolg van een onjuiste beschrijving van het resterende volume lucht, en de grootte van de wateroppervlakte daarna, is de totale aanslagtijd ongeveer 10% te klein.

Berekeningen, uitgevoerd voor zelf aanslaan, leveren een aanslagtijd op die kleiner is dan de gemeten tijd in prototype. De oorzaak is voor een deel gelegen in de onnauwkeurigheid waarmee het resterende luchtvolume wordt beschreven; voor een deel door de stromingssituatie in de kroon, die bij een dynamisch proces als zelf aanslaan afwijkt van de stationaire situatie, waarop de luchtdebietformules zijn gebaseerd.

Bij de stationaire stromingsproeven stond de luchttransportkapaciteit van stromend water centraal.

Omdat alle luchtdebietformules gebruik maken van de snelheid v_b op het in-sluitpunt is ook de bepaling ervan geanalyseerd.

Nagegaan is wat de invloed van de diverse parameters is op de grootte van de berekende v_b .

Voor een 40 proeven zijn vervolgens luchtdebieten berekend volgens de vijf luchtdebietformules gebruik makend van de op 4 manieren bepaalde v_b . (In totaal dus 20 debieten.) Een debiet dat max. 30% afweek van de gemeten waarde werd als "korrekt" beschouwd. Door vergelijking van het aantal korrekt voorspelde debieten, het aantal overschattingen en de gemiddelde waarden en spreidingen, is de konklusie gerechtvaardigd dat de formule van Ervine (2) de beste benadering is. Wel moet worden overwogen dat de onnauwkeurigheid van één en ander groot is. Immers de debietmeting van zowel het water als de lucht waren

nogal eens gebrekkig (als gevolg van luchtinsluiting resp. weersinvloeden).

Voornaamste konklusies

Afvoerkapaciteit

Voor alle combinaties van aantallen in bedrijfzijnde hevels kan dezelfde Q- ΔH -relatie worden gebruikt, namelijk die voor 6 kokers (fig. 15 en 22). De afwijking bedraagt maximaal 5%.

Verlieskoëfficiënten

Deze wijken nogal af van de modelwaarden en zijn enigszins afhankelijk van de ΔH : ξ wordt kleiner als ΔH groter wordt.

Voor 1 koker is $\xi \approx 2$

voor 3 kokers is $\xi \approx 1,8$ voor $0,6 < \Delta H < 1,6$

voor 6 kokers is $\xi \approx 1,9$.

Nauwkeurigheid debietmeting

De werkelijke waarde van het debiet ligt in tussen 89 en 105% van de gemeten debietwaarde.

Aanslaan met vakuumpomp

Aanslagtijd bij 1 pomp op 1 hevel : 17 min (in bedrijfssituatie: 25 min)

1 pomp op 2 hevels: 24 min (in bedrijfssituatie: 28 min)

2 pompen op 3 hevels: 20 min

3 pompen op 6 hevels: 25 min (in bedrijfssituatie: 32 min).

De luchtpompkapaciteit bedraagt bij

1 pomp op 1 hevel : $k_e = 0,28 \text{ m}^3/\text{s}$

1 pomp op 2 hevels: $k_e = 0,37 \text{ m}^3/\text{s}$

3 pompen op 6 hevels: $k_e = 0,35 \text{ m}^3/\text{s}$.

Berekening van de aanslagtijd volgens rekenprogramma van bijlage 4 is goed mogelijk mits beschrijving luchtvolume en grootte van de wateroppervlakte mogelijk is.

Voor situatie dat $\Delta H \approx 0$ is ook een berekening mogelijk volgens formule (B.9).

Zelf aanslaan

Zelf aanslaan is mogelijk gebleken voor waarden van $h_a < 4,40$ m.

Berekening van zelf aanslaan is alleen mogelijk als de beschrijving van de grootte van het luchtvolume, het wateroppervlak en de snelheid op het insluitpunt v_b mogelijk is. Daarnaast moet ook duidelijk zijn volgens welke formule de luchttransportcapaciteit goed wordt beschreven.

De gebruikte globale beschrijvingen zijn niet nauwkeurig genoeg gebleken.

Afslaan

De opening van de beluchtingsafsluiter A (de bedrijfsafsluiter) van $\emptyset 75$ mm voldoet goed. Bij $\Delta H \approx 0$ zijn de waterspiegels in de hevelbenen binnen de 1 minuut en 30 seconden beneden het kruinniveau gezakt. In 6 tot 7 minuten is de hevel geheel afgeslagen (in rust).

Voor de noodafsluiter met opening $\emptyset 80$ mm gelden globaal dezelfde tijden.

Ook bij een combinatie van A en B hoeft niet op een gevaarlijke situatie te worden gerekend.

Tot en met $\Delta H = 1,50$ is afslaan met afsluiter A alleen goed mogelijk gebleken.

Stationaire stroming

De relatie $Q_w - h_a$ bij diverse waarden voor ΔH in model en proto komen goed overeen. (Wel kunnen de prototypewaarden beïnvloed zijn door de onbekende hoeveelheid van bovenstrooms meegevoerde lucht.)

Met methode I en III (bijlage 6) is de insluitsnelheid goed te bepalen mits de daarvoor benodigde parameters betrouwbaar zijn. (Dit was bij de metingen lang niet altijd het geval.)

Luchttransportcapaciteit

Bij overeenkomstige ΔH is het maximum gemeten luchtdebiet kleiner dan de door Casteleyn op grond van geëxtrapoleerde modelresultaten voorspelde debieten. (Het onbekende luchtdebiet van bovenstrooms is hierin niet verdisconteerd.)

De formule van Ervine (2) beschrijft het transporteren van lucht het best (al blijft de van bovenstrooms aangevoerde lucht een onzekere faktor in het geheel).

2 Doel en opzet prototypemetingen

2.1 Algemeen

Het doel van de prototypemetingen is globaal gezien tweeledig:

- A) Er dienen gegevens te worden toegeleverd, die noodzakelijk zijn voor het toekomstig beheer (Aan- en Afslagprocedures ($Q-\Delta H$)-relaties).
 - B) Er dienen gegevens te worden verzameld, waarmee het vroegere modelonderzoek kan worden gecontroleerd en extrapolatie van modelresultaten naar prototype wordt mogelijk gemaakt.
- Zo mogelijk dienen hieraan algemene ontwerpregels te worden ontleend.

Zoals in [7] en [8] is aangegeven dient er onder een vijftal hydraulisch verschillende omstandigheden te worden gemeten, te weten:

1) De stationaire luchtstroming.

Deze ontstaat door toelaten van lucht in de kroon, en wel zodanig dat deze toevoer gelijk is aan de hoeveelheid lucht die door het water wordt afgevoerd.

2) Volledig aangeslagen.

Is de hevel volledig aangeslagen (dat wil zeggen: is alle lucht uit de kroon getransporteerd) dan is de stroming als gevolg van de getijvariatie op het Krammer weliswaar niet stationair, maar de variaties zijn zo langzaam dat de versnellingskrachten in de stroming zijn te verwaarlozen en de neerontwikkeling zich steeds kan aanpassen. (Daarom wordt wel gesproken van een kwasi-stationaire stroming.)

3) Het aanslaan met de vakuumpomp.

Door de vakuumpomp wordt de (lucht)druk in de kroon van hevel verlaagd, waardoor de waterspiegels in de benen stijgen. Is een van beide waterspiegels boven het niveau van de knie opgetrokken dan begint de hevel af te voeren. Zolang niet alle lucht verdwenen is, is de hevel niet volledig aangeslagen.

4) Het zelf aanslaan.

Het stromende water in de hevel kan, mits de waterstand in het bovenbeen maar hoog genoeg is, en het verval over de hevel voldoende groot, lucht transporteren en dus vanuit de kroon naar buiten de hevel afvoeren.

De vakuumpomp kan nu worden afgezet en de hevel slaat zichzelf volledig aan.

5) Afslaan.

Wordt de onderdruk in de hevelkroon opgeheven (door daarin lucht toe te laten) dan zal de hevelwerking beëindigd worden. Het is duidelijk dat de luchttoevoer groter moet zijn in de luchtafvoer door het stromend water.

2.1 Gegevens nodig voor toekomstig beheer

Voor volledig aangeslagen hevel:

- a) de afvoerkapaciteit (o.a. $Q-\Delta H$ -relatie)
- b) de energieverlieskoëfficiënten voor de diverse leidingstrajekten en de totale verlieskoëfficiënt.

Voor het aanslaan:

- c) de tijdsduur van aanslaan met de vakuumpomp
- d) de tijdsduur van zelf aanslaan nadat, bijvoorbeeld met de luchtpomp, een waterstand h_a in het bovenbeen is bereikt
- e) luchtpompkapaciteit.

Voor afslaan:

- f) De tijdsduur van afslaan
- g) de grootte van de openingen van de beluchttingsafsluiters
- h) het maximum verval waarbij nog kan worden afgeslagen.

Van belang is de overweging dat de aspecten a) en b) afhankelijk zijn van het aantal in bedrijf zijnde kokers. De aspecten c) en d) van het aantal hevelkokers, het aantal pompen en het verval. Terwijl aspect f) een functie is van het verval.

2.2 Gegevens nodig voor verifikatie modelonderzoek

De gegevens nodig voor de verifikatie van het gedane modelonderzoek (trouwens ook voor toekomstig ontwerp) behelzen vooral de luchttransport- en de beluchtingsaspecten omdat deze aan schaaleffekten onderhevig zijn. (Om deze reden zijn destijds in twee modellen met verschillende schaal proefnemingen verricht.)

In het prototype-onderzoek moet hiervoor worden onderzocht:

voor stationaire situaties:

a) het luchttransporterend vermogen bij stationaire stroming

voor volledig aangeslagen hevel:

b) verloop van piëzometrisch niveau en de energieverliezen

voor aanslaan:

c) aanslagtijden

d) zelf aanslagtijden

voor afslaan:

e) afslagtijden

f) luchtdebieten tijdens afslaan.

2.3 Gegevens nodig voor toekomstig ontwerp

Bij een hevelontwerp moet kunnen worden afgeschat welke luchtdebieten minimaal (en maximaal) nodig zijn om te kunnen afslaan. Vereist is dan ook:

a) het luchttransporterend vermogen te kunnen afschatten bij verschillende vervallen, en waterstanden in de hevelbenen voor stationaire stroming. Met behulp van resultaten van prototype-onderzoek dienen de luchttransportformules, opgesteld in M1347/M1348 [3] te worden gecontroleerd. Daarnaast worden ook de formules van Thomas [4] en Ervine [5], [6] gecontroleerd. Zo mogelijk moet worden aangegeven welke formule het luchttransport het beste beschrijft.

Voor de dynamische situatie (tijdens aanslaan met de luchtpomp en zelf aanslaan) moet nagegaan worden:

- b) hoever de dynamische situatie afwijkt van de stationaire
- c) in hoeverre een kwasi-stationair rekenmodelletje behulpzaam kan zijn bij het bepalen van de aanslagtijden en het bepalen van waterstanden in de hevelbenen als functie van de tijd.

2.4 Gemeten parameters en wijze van meten

Zoals in [7] en [8] al is aangegeven, betekent bovenstaande dat de hieronder beschreven parameters gemeten dienen te worden. Tevens is daar aangegeven in welke situatie en hoe deze parameters worden bepaald. Gemeten is uitsluitend in koker 2.

De positie waarop de diverse parameters worden bepaald, is aangegeven in figuur 1.

Het waterdebiet (Q)

Het waterdebiet Q werd met een akoestische debietmeter (a.d.m.) bovenstrooms van de knie gemeten op positie 8.

Doordat veel lucht werd ingesloten nabij de instroming van de hevelkokers heeft de a.d.m. bij grotere vervallen niet gefunctioneerd in situaties met weinig kokers in bedrijf.

Daarom is een provisorische Ott-molen opstelling gerealiseerd in de instroomopening van de koker waarin werd gemeten (op positie 8a).

Door de Ott-molen voor lage debieten te ijken met de a.d.m. ontstond de mogelijkheid ook grotere debieten te kunnen bepalen. Uitgangspunt is hierbij de aanname dat er een lineair verband bestaat tussen het aantal omwentelingen van de molen (O) en de grootte van de Q.

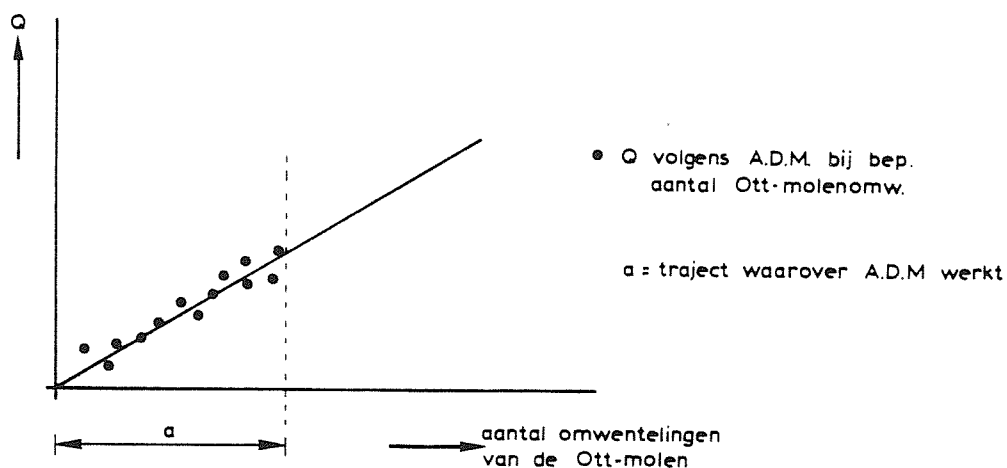
$$Q = k \cdot O \quad (1)$$

k is een konstante.

Het stroombeeld moet dan onafhankelijk van de Q zijn.

Voor elk aantal stromende kokers is in principe een ijking vereist omdat het stroombeeld zal variëren.

Figuur 2.1 geeft schematisch deze ijking aan.



Figuur 2.1

Helaas werd het goed functioneren van de Ott-molen sterk beïnvloed door verontreinigingen in het water (zeewier en -gras).

Bij de situatie met twee kokers is de informatie van de Ott-molen vermoedelijk om deze reden zeer onbetrouwbaar gebleken, voor een deel zelfs geheel afwezig.

Het luchtdebiet (Q_L)

Het luchtdebiet Q_L werd afhankelijk van de hoeveelheid gemeten op positie 9 van figuur 1, door een of meer, op de kroon van de hevel aangesloten meetkelken (figuur 2 geeft een schets van de opstelling). De drukval over de meetkelk is een maat voor de luchtsnelheid (en dus voor het debiet) in de luchtpijp. Deze meetkelken zijn ontworpen volgens ISO normen [9]. Modelonderzoek uitgevoerd door WL wees evenwel uit dat de vorm van de kelken vereenvoudigd kan worden (cirkelvormige in plaats van ellipsvormige inlaat). De grafiek van figuur 2 geeft de Q_L - ΔH -relaties.

De invloed van zijwind op de metingen is in [10] nader onderzocht. De grafiek van figuur 3 geeft de fout in de meting als functie van de verhouding windsnelheid/snelheid in de kelk.

Bij aanslaan (proces 3 en 4 van par. 2.0) kan het luchtdebiet niet met dit meetsysteem worden bepaald. Dit dient dan volumetrisch te worden vastgesteld met behulp van de waterstand in de hevelbenen en de luchtdruk in de kroon.

Voor dit doel zijn grafieken opgesteld, die uitgaande van een bepaald verval over de hevels en de waterstand in het bovenbeen aangeven hoe groot het volume van de luchtkamer is.

Deze grafieken geven maar een zeer globale indicatie. Ze zijn bepaald met behulp van figuur 4 $\Delta H = 1,60$ m, voor zowel 1) stationaire stroming, 2) zelf aanslaan, 3) aanslaan met de luchtpomp. Waterstanden bij andere vervallen zijn, uitgaande van deze figuren, geschat. Deze grafiek voor aanslaan met de pomp wordt gegeven in figuur 5.

Drukken (p)

Op de vijf in figuur 1 aangegeven posities 11 t/m 15 zijn de drukken gemeten met behulp van drukdozen.

Deze drukken dienen o.a. ter bepaling van energieverliezen over de diverse trajekten van de hevel. De druk in de kroon is een belangrijke parameter bij luchttransport. De drukken aan het plafond zijn van belang bij het afslaan. Een criterium is immers dat de bij afslaan snel vallende waterkolommen in de hevelbenen, geen ontoelaatbaar grote klappen veroorzaken op het plafond van de horizontale leidingdelen.

Waterstanden buiten de hevel (h_2 en h_4)

Zijn de hevels eenmaal operationeel dan worden alleen nog de waterstanden aan weerszijde van de totale constructie geregistreerd, met een borrelbuis meet-systeem (op de positie 2 en 4 van figuur 1).

Deze waarden zijn dan ook bij alle proeven, nodig voor het toekomstig beheer, vastgelegd.

Energiehoogten (H_1 en H_3)

Voor het verifiëren van de modelresultaten is een nauwkeuriger informatie over de energiehoogte vereist. Om deze reden zijn met 2 HISTOS-meetpalen, voldoende ver van de in- en uitlaatconstructie van de hevel, via vlotterschrijvers de waterstanden geregistreerd (in positie 1 en 3 van figuur 1).

Het begrip energiehoogte wordt hier als benadering ingevoerd; de snelheids-hoogte zou bij de gemeten waarde moeten worden opgeteld. Deze is maximaal 0,03

m en wordt verwaarloosd.

Waterstanden in de hevelbenen (h_a en h_b)

Voor controle van alle modelgegevens met betrekking tot luchtaspekten en extrapolatie hiervan (via luchtformules bijvoorbeeld) naar prototype is informatie over de waterstand in beide hevelbenen onontbeerlijk. Hieruit (en uit de druk in de kroon) kan o.a. de snelheid ter plaatse van het insluitpunt worden bepaald.

Bij afslaan dienden beide waterspiegels te worden gevolgd. (Ze mogen niet onder het plafond van de horizontale leidingdelen komen.)

Daarnaast zijn de waterstanden noodzakelijk voor de volumetrische debietbepaling (zoals bij het ijken van de vakuumpomp en luchtdebieten tijdens afslaan). Bij alle proeven worden deze geregistreerd. Deze waterstandbepaling geschiedt met kelkbakens.

Bij de bepaling van de h_a en de h_b dient de positie van de kelkbakens in acht te worden genomen. In het bovenbeen is de kelkbaak aan de zijwand, halverwege plafond en vloer aangebracht. Zoals uit figuur 4 blijkt is voor de bepaling van de eigenlijke h_a een korrektie nodig op de gemeten waarde. Afhankelijk van de hoogte waarop h_a wordt bepaald varieert deze korrektie van +0,05 m bij h_a tot 0 bij $h_a = m + \text{NAP}$.

De kelkbaak in het benedenbeen is op 0,80 m uit het plafond aangebracht.

Waterstanden in de woelbak (h_{5a} en h_{5b})

Om uittreeverliezen en de verliezen over de debietbegrenzer te kunnen vaststellen moet de waterstand in de woelbak bekend zijn. Op 2 posities (5a en 5b) zijn deze door vlotterschrijvers vastgelegd.

Verder zijn nog geregistreerd: de windsnelheid en incidenteel de temperatuur in de kroon.

Op verzoek van Directie Bruggen is ook de druk in de vakuundleiding vlak voor de luchtpomp vastgelegd.

2.5 Wijze van registratie van de meetgegevens

Alle meetsignalen zijn via penschrijvers geregistreerd. De meer dynamische signalen zijn ook op magneetband opgeslagen.

Om een snelle verwerking van de gegevens te kunnen realiseren is van een HP-85 personel computer en "datalogger" gebruik gemaakt om van de signalen "monsters" te nemen en deze "weg te schrijven" in een matrix (die op cassettebandjes wordt opgeslagen). Er is een viertal matrices opgesteld, één voor elke stromingssituatie.

De computer kan de in deze matrices opgeslagen gegevens snel verwerken, waardoor alle gewenste relaties kunnen worden bepaald, en uitgetekend door een "plotter" resp. getabelleerd door middel van een "printer".

In bijlage 1 is per stromingssituatie aangegeven op welke wijze de verschillende parameters zijn vastgelegd.

3 Te onderzoeken relaties

3.0 Algemeen

Het overzicht van bijlage 2 geeft aan welke relaties in het modelonderzoek M1347-M1348 zijn bestudeerd en weergegeven. Bij alle modelproeven was de bovenwaterstand NAP -0,20 m. Een groot aantal relaties is in [1], [2] en [3] alleen gepresenteerd bij het standaardverval $\Delta H = 1,60$ m. Dit konstante verval van $\Delta H = 1,60$ m was bij de prototypemetingen uiteraard niet te realiseren. Vergelijking met waarden bij andere vervallen moet dan met de nodige voorzichtigheid geschieden.

De relaties, die met behulp van waarden uit de prototypemetingen worden opgesteld, zijn in bijlage 3 (ontleend aan de voorstudie) aangegeven. Hierna worden deze relaties afzonderlijk besproken. Hierbij wordt de indeling volgens paragraaf 2.0 zo veel mogelijk aangehouden, te weten:

- 1) van belang voor het beheer
- 2) voor modelverifikatie
- 3) voor toekomstig ontwerp.

3.1 Relaties voor het beheer

3.1.1 Volledig aangeslagen

3.1.1.1 Afvoerkapaciteit

Een eerste vereiste voor het beheer is het kennen van de $Q-\Delta H$ relatie voor een volledig aangeslagen hevel. Deze relatie is eenvoudig te bepalen. Gedurende één getij moet hiervoor op een aantal tijdstippen (bij een bepaalde ΔH dus) de Q gemeten worden.

De ΔH is het verschil tussen de energieniveau's (de waterstanden) op de Krammer en op de Grevelingen. Dit wordt bepaald uit metingen van de waterstanden op punt 1 en 3 van figuur 1. Hierbij zou de snelheidshoogte moeten worden opgeteld, maar deze bedraagt maximaal 0,03 m en wordt voorlopig verwaarloosd.

Tevens worden de waterstanden op positie 2 en 4 vastgelegd, waardoor ijking van de installatie mogelijk is. Deze laatstgenoemde meetpunten blijven immers

in de uiteindelijke beheersfase de enige meetpunten.

Nu is het mogelijk dat de waterstand op de Grevelingen (H_1) enigszins varieert. Het is dan zinvol de invloed van deze peilvariatie na te gaan. Het lag overigens niet in de bedoeling deze peilvariaties opzettelijk aan te brengen, maar wel om de eventueel optredende variaties te verwerken.

Dit kan resulteren in een grafiek zoals in figuur 3.1 is geschetst.

Van belang is de overweging dat om economische redenen slechts in één koker gemeten wordt. Bij proeven met meerdere kokers moeten de betreffende Q's worden ontleend aan metingen in model [10], en aan beschouwingen betreffende energieverliezen in de betrokken kokers.

Bij de prototypemetingen wordt de Q gemeten in koker 2 en wel bij

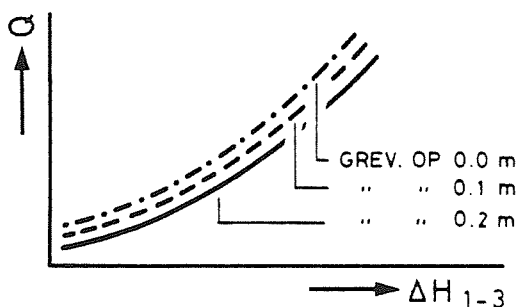
- a) één koker aangeslagen
- b) twee kokers aangeslagen van dezelfde groep
- c) drie kokers aangeslagen
- d) alle zes kokers aangeslagen (figuur 3.2)

Om de totale hoeveelheid water te bepalen die tijdens eb gespuid is (Vol_s) moet uit de Q- ΔH -kromme en de getijkromme een Q-t relatie worden afgeleid.

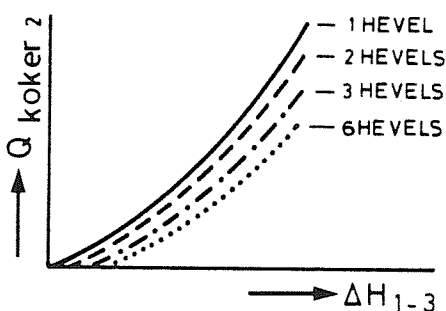
Uit:

$$Vol_s = \int_0^T Q(t) dt \tag{2}$$

volgt dan deze hoeveelheid.

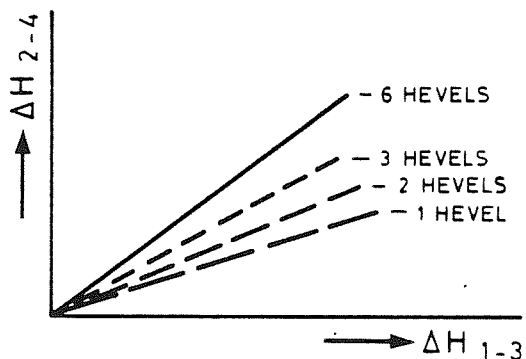


Figuur 3.1

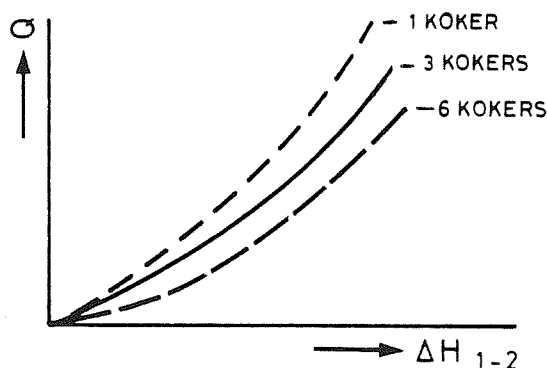


Figuur 3.2

De relatie $\Delta H_{2-4} (= H_2 - H_4) - \Delta H_{1-3} (= H_1 - H_3)$ is zinvol omdat hieruit de invloed van aantal kokers dat is aangeslagen op de ΔH_{2-4} blijkt. (Een schets hiervan geeft figuur 3.3.)



Figuur 3.3



Figuur 3.4

De relaties $Q - \Delta H_{1-2} (= H_1 - H_2)$ en $Q - \Delta H_{3-4} (= H_3 - H_4)$ geven een indruk van de spiegelafzinking ter plaatse van 2 en 4, afhankelijk van het aantal werkende kokers.

De meting van de waterstand in punt 5a en 5b moet een schatting van de totale energieverliezen over de kokers mogelijk maken (exclusief de debietbegrenzer). Omdat de juiste plaats voor een waterstandsbeplating (tussen de debietbegrenzer en de kokers) niet gemakkelijk valt aan te geven worden op twee punten (5a en 5b) de waterstanden bepaald.

3.1.1.2 Energieverliezen

Bij een volledig aangeslagen hevel is uit de meting van: 1) het verval over de hevel, 2) het debiet (voor de v_{gem}) en 3) de drukken op de diverse punten (11, 12, 13, 14, 15) mogelijk het verloop van de energielijn vast te leggen (zie fig. 3.5).

Immers:

$$\Delta H = \xi_{tot} \frac{v_{gem}^2}{2g} = \Delta H_{1-11} + \Delta H_{11-12} + \Delta H_{12-14} + \Delta H_{14-3} \quad (3)$$

$$\Delta H = (\xi_{1-11} + \xi_{11-12} + \xi_{12-14} + \xi_{14-3}) \frac{v_{gem}^2}{2g} \quad (4)$$

waarbij bijvoorbeeld voor het piezometrisch niveau van 11 geldt:

$$p_{n11} = h_1 - \frac{v_{gem}^2}{2g} - \xi_{1-11} \frac{v_{gem}^2}{2g} + p_a \quad (5)$$

$$p_{n11} = p_{11} + h_{11} \quad (6)$$

p_a = atmosferische druk (in mwk)

p_{11} = de druk (in mwk)

h_{11} = de plaatshoogte (zie fig. 3.5)

Uit (5) en (6) volgt:

$$\xi_{1-11} = \frac{2g}{v_{gem}^2} (h_1 + p_a - p_{11} - h_{11}) - 1 \quad (7)$$

Nu is

$$h_1 + p_{atm} = h_{11}^{\circ} + p_{11}^{\circ} \quad (8)$$

waarbij p_{11}° de druk is in punt 11 voor aanvang van de proef
(bij stilstaand water dus) en

h_{11}° = h_{11} de plaatshoogte van het plafond t.o.v. NAP is (op elk tijdstip dezelfde waarde).

zodat

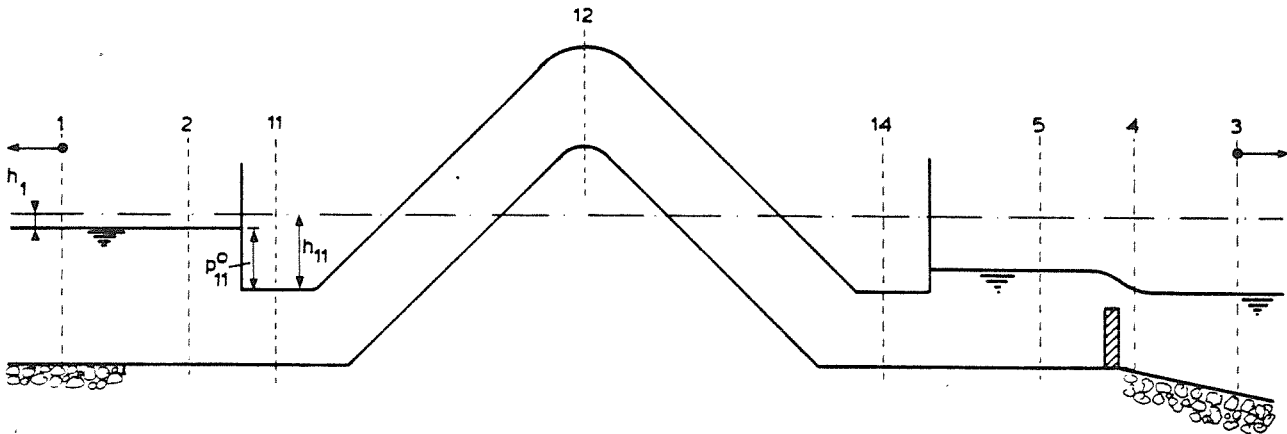
$$p_{atm} = h_{11} + p_{11}^{\circ} - h_1 \quad (9)$$

Hieruit volgt dat

$$\xi_{1-11} = \frac{2g}{v_{gem}^2} (p_{11}^{\circ} - p_{11}) - 1 \quad (10)$$

Op soortgelijke wijze volgt dat:

$$\xi_{14-3} = - \frac{2g}{2v_{gem}} (p_{14}^o - p_{14}) + 1 \quad (11)$$



Figuur 3.5 Posities drukmetingen

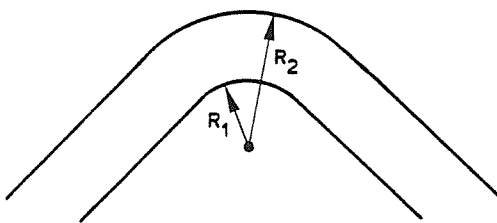
De ξ_{1-12} is uit de drukregistraties moeilijk rechtstreeks af te leiden want de p_{12} (de druk in de kroon) is gemeten op een positie waarin geen hydrostatische druk heerst. De centrifugale kracht van het stromend water verhoogd de druk bij grotere debieten aanzienlijk.

Theoretisch (uitgaande van de veronderstelling van potentiaalstroming in de kruin) bedraagt p_{12} :

$$p_{12} = h_1 + p_{atm} - h_{12} - \frac{v_{gem}^2}{2g} \left(\xi_{1-12} + \left(\frac{R_2 - R_1}{R_2 \ln R_2/R_1} \right)^2 \right) \quad (12)$$

R_1 = straal van de kruin (fig. 3.6)

R_2 = straal van de kroon



In een situatie van (veronderstelde) potentiaalstroming geldt

$$v = R \cdot K \quad (13)$$

$$q = \int_{R_1}^{R_2} v dR \text{ dus} \quad (14)$$

$$q = K \ln R_2/R_1 \text{ en} \quad (15)$$

$$v = \frac{q}{R \ln R_2/R_1} \quad (16)$$

Figuur 3.6 Hevelknip

3.1.2 Aanslaan

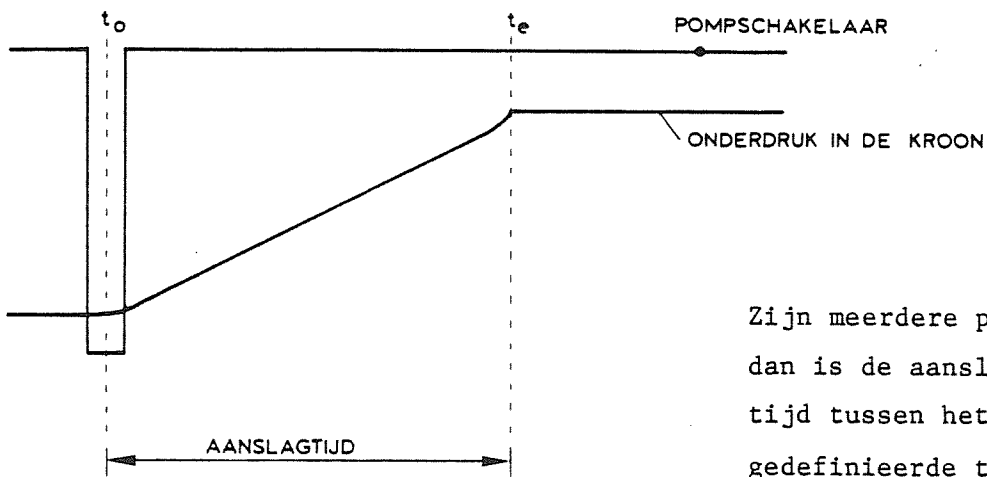
3.1.2.1 Tijdsduur van aanslaan met de vakuumpomp

Onder de aanslagtijd T wordt verstaan de tijd die verloopt tussen het starten van de vakuumpomp (t_0) en het tijdstip (t_e) waarop de druk in de kroon "konstant" wordt, d.w.z. niet verder afneemt.

Wordt de pomp niet gestopt dan zal deze water uit de hevel onttrekken.

Het tijdstip van aanslaan van de vakuumpomp is gedefinieerd als het tijdstip t_0 dat ligt midden tussen het moment van inschakelen en "overschakelen" in de "driehoek"schakeling; deze beide laatste momenten zijn op de schrijvers geregistreerd.

Zie voorbeeld van figuur 3.7.



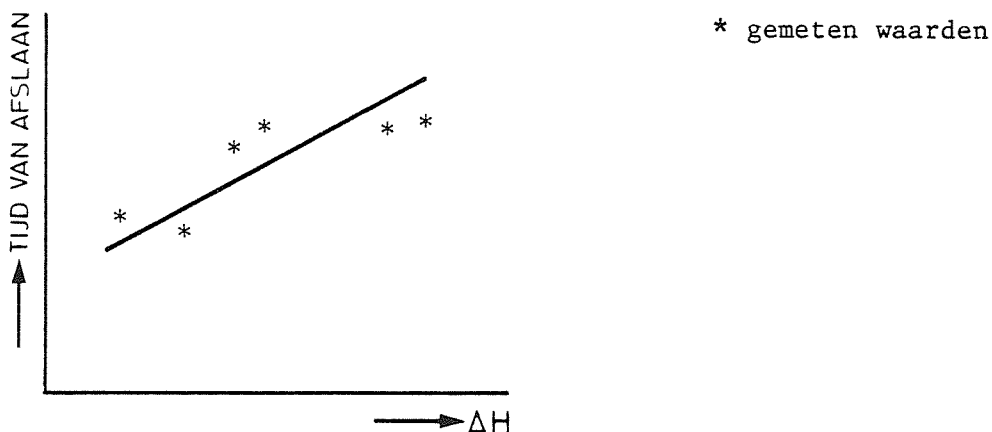
Zijn meerdere pompen benut dan is de aanslagtijd de tijd tussen het op deze wijze gedefinieerde tijdstip (t_0) voor de eerste pomp en t_e

Figuur 3.7

Volgens bovenstaande is de aanslagtijd tijdens de prototypeproeven bepaald. In de definitieve situatie is het vergelijkbare tijdstip t_0 , het moment waarop afsluiter B' (op de tank met het waterslot) wordt geopend.

De tijdsduur van aanslaan als functie van het verval kan direkt worden gemeten.

Nu zal het peil op de Grevelingen wel niet konstant (-0,20 m NAP) zijn, zodat "middeling" nodig is, zoals schematisch in figuur 3.8 is aangeduid.



Figuur 3.8

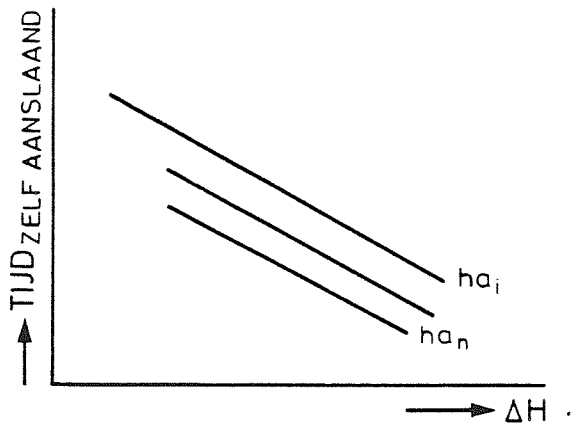
Vanaf een bepaalde waterstand ($h_a > 4,40$ m NAP in model) zal de stroming zelf ook lucht afvoeren. In het modelonderzoek bleek evenwel deze hoeveelheid lucht erg klein te zijn ten opzichte van het luchtpompdebiet. Alleen als zich in het benedenbeen een dekneer heeft ontwikkeld (wat bij stationaire stroming het geval is) zal de luchtafvoer door de stroming zelf "redelijk" groot kunnen zijn. Bij aanslaan met de pomp krijgt de stroming in elk geval niet de gelegenheid de dekneer volledig te ontwikkelen.

3.1.2.2 Tijdsduur van zelfaanslaan

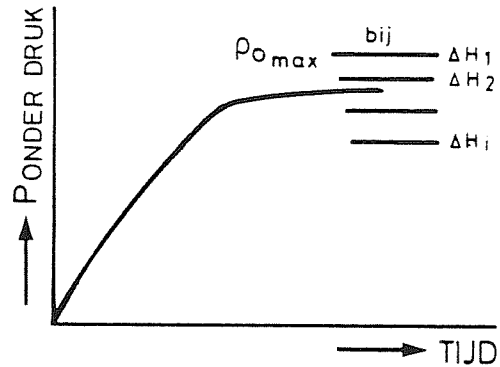
Ook hierbij is de relatie tijdsduur-verval de voornaamste.

Nadat met de vakuumpomp de waterstanden voldoende verhoogd zijn zal de hevel (nadat de pomp is uitgeschakeld) zich zelf verder aanslaan omdat het stromende water de lucht afvoert. Deze luchtafvoer is afhankelijk van de ΔH en de h_a . De tijdsduur van zelf aanslaan kan eveneens rechtstreeks gemeten worden. De grafische presentatie is in figuur 3.9 geschetst.

Het tijdstip van "aangeslagen zijn" dient aan de grootte van de onderdruk te worden ontleend. Zodra de druk in de kroon niet verder afneemt (of de onderdruk niet verder toeneemt) is de hevel aangeslagen (zie fig. 3.10)



Figuur 3.9



Figuur 3.10

3.1.2.3 Luchtpompkapaciteit

De ijkgrafiek van de luchtpompen (opgegeven door de fabrikant) is tijdens proefnemingen van Directie Bruggen korrekt gebleken (fig. 6).

Van belang is evenwel de overweging dat de druk, uitgezet langs de horizontale as, de druk aan de aanzuigzijde van de pomp is. Nu heeft het leidingsysteem tussen vakuumpomp(en) en de hevelkroon (c.q.)-kronen) een relatief hoge weerstand. Hierdoor kan de effectieve capaciteit van de pomp(en) aanzienlijk gereduceerd worden. Door tijdens de prototypeproeven zowel de druk in de hevelkroon als aan de aanzuigzijde van de vakuumpomp te registreren, is het mogelijk de effectieve capaciteit (K_e) af te leiden uit de theoretische K (van de ijkgrafiek)

Daarnaast is uit registratie van de waterstanden in de hevelbenen (h_a en h_b) als functie van de tijd, tijdens het aanslaan met de pomp, op eenvoudige wijze een eerste indruk van de luchtpompkapaciteit te verkrijgen. Een voorwaarde hiervoor is dat bij de gemeten combinatie van h_a en h_b (of ΔH) het volume van de "luchtkamer" bekend is. Er mag dan ook geen lucht door het water worden afgevoerd. Dit volume is te ontleen aan figuur 5. Deze figuur is opgesteld aan de hand van modelonderzoek voor aanslaan met pomp.

Als eerste benadering is de luchtpompkapaciteit K_a :

$$K_a = \left(A + \frac{V_o}{N-y} \right) \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (17)$$

waarbij A = wateroppervlak als waterspiegel op y m

V_o = volume luchtkamer op t = 0

N = atmosferische druk (mwk)

Δy = stijging waterspiegel in Δt s

y = positie waterspiegel t.o.v. y_o op t = 0.

Voor de afleiding van deze formule: zie bijlage B.4.2.

Deze formule kan nu worden toegepast voor die situatie, waarbij h_a wordt opgetrokken van $h_a = h_1$ tot $h_a = 3,00 \text{ m} + \text{NAP}$ (het niveau van de kruin). In dit geval wordt er geen lucht afgevoerd door het water ($Q = 0$) en is het luchtkamervolume gemakkelijk te bepalen. Verder is

$$A = 3.2 * 3.2 * \sqrt{2} * 2 = 28,963 \text{ m}^2$$

$$\Delta y = 3,00 - (h_1)$$

$$y = 0.$$

Uit meting van de druk in de kroon valt eveneens te leiden wat de waterspiegelstijging is als functie van tijd.

$$\text{Omdat: } P * V = \text{konstant} = C \quad (18)$$

is de volumeverandering van de lucht te bepalen en hieruit de capaciteit van de pomp te bepalen.

Stel op tijdstip t_o is de druk: P_o (atmosferisch).

Het volume V_o is dan eveneens bekend omdat ΔH gemeten is (en dus h_a en h_b bekend zijn).

$$\text{Nu is } P_o * V_o = C \quad (18a)$$

Na t. seconden is de luchtdruk P_1 . Zou het proces isotherm verlopen dan moet voor volume V_1 gelden

$$V_1 = C/P_1 \quad (19)$$

De verandering van de druk $P_o - P_1$ is een maat voor de stijging van de waterspiegel (ΔY) volgens:

$$\Delta Y' = P_o - P_1 \quad (20)$$

Er is dan een volume lucht verpompt in t. seconden:

$$K_b * t = \{V_1 - (V_o - \Delta y * A)\} \frac{(P_o + P_1)}{2P_o} \quad (21)$$

A = totale oppervlakte van de waterspiegel

$$A = 3,2 * 3,2 * \sqrt{2} * 2 \text{ m}^2$$

$\frac{(P_o + P_1)}{2P_o}$ = een benaderende faktor, die ter korrektie wordt ingevoerd omdat tijdens evacueren de druk in de kroon daalt van P_o tot P_1

De capaciteit van de luchtpomp is dus

$$K = \frac{V_1 - (V_o - \Delta Y * A)}{t} * \frac{(P_o + P_1)}{2P_o} \quad (22)$$

Formule (17) en (22) vertonen sterke gelijkenis. Formule (22) was opgezet om uitgaande van een meting van alleen de p_{12} (de druk in de kroon) de capaciteit te kunnen bepalen.

In geval h_a wordt opgetrokken van h_1 tot de kruin luidt (22) uitgedrukt in waarden voor de gemeten drukken

$$K_b = \frac{\frac{P_o V_o}{P_1} - (V_o - (P_o - P_1)A)}{\Delta t} * \frac{P_o + P_1}{2P_o} \quad (23)$$

of:

$$K_b = \frac{P_o^2 - P_1^2}{2P_o \Delta t} \left(\frac{V_o}{P_1} + A \right) \quad (24)$$

N.B. Er zal aan de hand van de resultaten gecontroleerd moeten worden of de aanname $PV = C$ korrekt is. Met andere woorden of het proces inderdaad isotherm verloopt. Ingeval van adiabetische dekompresie geldt:

$$(PV)^a = C.$$

In de hevelkroon zal dan ook (incidenteel) de temperatuur worden geregistreerd.

3.1.3 Afslaan

3.1.3.0 Algemeen

Afslaan geschiedt onder normale omstandigheden bij nagenoeg "gelijk water" ($\Delta H = 0$) met een membraanafsluiter die slechts een kleine opening vrijgeeft (afsluiter A). Dit wordt gerealiseerd door een smoorplaat voor de afsluiter te plaatsen. De grootte van deze opening moet door de prototypeproeven worden vastgesteld.

In figuur 2 is een schets opgenomen van de luchtdebiet meetopstelling. Hierin zijn drie afsluiters A, B en C opgenomen waarvoor de meetkelken zijn geplaatst. Het was voor de aanvang van de proeven nog onduidelijk of in de uiteindelijke beheerfase afsluiter C aanwezig zal zijn.

Van afsluiter A lag de snelheid van openen reeds vast: deze afsluiter doet namelijk elk getij een keer dienst, waardoor snel openen een vereiste is. Hierdoor kan al te grote slijtage worden voorkomen (in 2 à 3 seconden gaat A open).

Afsluiter B is de noodafsluiter, die bedoeld is te functioneren als A geweigerd heeft. De opvattingen betreffende het functioneren van de afsluiter B zijn tijdens de proefnemingen aanzienlijk gewijzigd.

Aanvankelijk was de bedoeling afsluiter B langzaam maar geheel open te sturen als afsluiter A niet gefunctioneerd had (bij $\Delta H = 0$).

Omdat spoedig bleek dat met kleine afsluiteropeningen tot bij groter vervallen afslaan mogelijk was, terwijl de wens bestond de besturing zo eenvoudig mogelijk te houden, is de afslagprocedure aanzienlijk vereenvoudigd als volgt.

Weigert afsluiter A dienst, dan wordt afsluiter B één minuut later, vertraagd (in 1 minuut) opengestuurd. Afsluiter B wordt eveneens van een flens (met een gat) voorzien.

Er is een noodsituatie denkbaar waarbij A en B gezamenlijk (d.w.z. B één minuut na A) open gaan.

3.1.3.1 Tijdsduur van afslaan

Zowel de tijd (T_a) waarin h_a zakt tot kruinpeil (3,00 m + NAP) als de tijd T_b waarin h_a en h_b zakken tot op h_1 resp. h_3 dienden voor de vastgestelde afsluiter openingen te worden bepaald als functie van ΔH .

Is de keuze van de afsluiteropeningen eenmaal gemaakt dan zijn van belang de relaties p_{12} -t en Q_L -t.

3.1.3.2 Grootte van de beluchtingsopeningen

Het maatgevende criterium bij afslaan zijn de (eventuele) klappen, die de snel dalende waterkolommen in de hevelbenen kunnen uitoefenen op het plafond van het horizontale leidingdeel van de hevel. (Door traagheidsinvloeden kunnen de dalende waterspiegels onder het plafond-niveau schieten.) Beoordeling van dit criterium vindt plaats aan de hand van de verplaatsing van de waterspiegels (h_a en h_b) en de drukken op positie 11 en 14 (van fig. 1).

Het is zaak de beluchtingsopeningen zo groot te kiezen dat de hevel snel genoeg afslaat zonder te grote dynamische verschijnselen te veroorzaken.

De verwachting bestaat dat als een bepaalde afsluiteropening bij stilstaand water ($\Delta H = 0$) geen ontoelaatbare verschijnselen veroorzaakt, de situatie bij stromend water zeker veilig is, omdat een deel van de lucht door het stromend water wordt afgevoerd.

Konsekwenties voor prototypemetingen

Omdat onder normale omstandigheden steeds bij $\Delta H \approx 0$ wordt afgeslagen, diende van deze situatie $\Delta H \approx 0$ bij zoveel mogelijk beproevingen gebruik te worden gemaakt om af te slaan.

Een keuze die na de proeven gemaakt moet worden is verder of de 6 afsluiters A (van de 6 hevelkokers): 1) te gelijkertijd, of 2) na elkaar (met korte tussentijd), moeten afslaan.

ad 1) Hierbij is langzaam afslaan mogelijk, maar er kan geluidsoverlast optreden. Niet zozeer bij afslaan, wanneer de lucht de koker in wordt gevoerd, maar wel bij het opheffen van de overdruk.

ad 2) Deze oplossing vraagt een grotere opening van de afsluiter (omdat er minder tijd beschikbaar is per hevel) waardoor de zekerheid dat hij afslaat groter is. Deze geeft ook minder geluidsoverlast.

Bij de beproeving is aan dit aspekt van eventuele geluidsoverlast aandacht besteed.

Beoordeling van een en ander vindt voornamelijk plaats aan de hand van de registraties:

- a) $h_b - t$ en $h_a - t$ bij diverse ΔH (voor een bepaalde opening van afsluiter A en van afsluiter B)
- b) p_{11} en $p_{14} - \Delta H$ (voor een bepaalde opening van afsluiter A en van afsluiter B)
- c) $Q_L - t$ bij diverse ΔH (voor een bepaalde opening van afsluiter A en van afsluiter B)
- d) $T - \Delta H$

3.2 Relaties voor verifikatie modelonderzoek

3.2.0 Algemeen

Voor de verifikatie van het modelonderzoek zijn naast de controle op de afvoerkapaciteit en de energieverliezen vooral de luchtaspekten belangrijk. Deze zullen hieronder nader worden aangeduid.

3.2.1 Luchttransporterend vermogen bij stationaire stroming

Een groot deel van het onderzoek M1347-M1348 behelsde het luchttransporterende vermogen van de stroming, onder de verschillende hydraulische omstandigheden. Dit vooral omdat het luchtaspekt sterk aan schaaleffekten onderhevig is.

In bovengenoemd modelonderzoek zijn twee extrapolatiefunkties opgesteld voor bepaling luchttransportkapaciteit.

Voor prototypesituaties geven deze twee technieken evenwel sterk uiteenlopende resultaten.

Bij stationaire situaties zullen zoals in bijlage 3 wordt aangegeven de volgende relaties worden vastgelegd.

- 1) $Q_L - Q_w$ bij diverse ΔH
- 2) $Q_L - h_a$ bij diverse ΔH .

Wellicht kunnen deze relaties behulpzaam zijn bij de beoordeling van bovengenoemde extrapolatietechnieken.

3.2.2 Aanslaan

De in bijlage 2 aangegeven relaties, die voor aanslaan in model zijn onderzocht, zullen zoveel mogelijk opnieuw worden opgesteld aan de hand van prototypegegevens (bijlage 3).

Voor zowel aanslaan met de vakuumpomp als voor zelf aanslaan zijn dit de relaties:

- 1) $h_a - t$ voor diverse ΔH
- 2) $T - \Delta H$ ($T =$ de totale tijdsduur)
- 3) $P_{12} - h_a$ voor diverse ΔH .

De relaties die vergelijking tussen modelonderzoek en prototype-onderzoek voor zelf aanslaan mogelijk moeten maken zijn verder nog:

- 4) $Q_1 - h_a$ voor diverse ΔH
- 5) $Q_L - p_{12}$ voor diverse ΔH .

3.2.3 Afslaan

Gepoogd zal worden luchtdebieten en afslagtijden te registreren en weer te geven (als functie van ΔH). Hiermee zijn de relaties van bijlage 3 op te stellen, die een vergelijking met modelonderzoek mogelijk moeten maken.

3.3 Relaties voor toekomstig ontwerp

3.3.1 Luchttransporterend vermogen in stationaire situatie

Vele problemen die bij het hevelontwerp een belangrijke rol spelen, hebben te maken met het luchttransporterende vermogen van het water.

Vandaar het belang van het controleren van een aantal formules, die ooit zijn opgezet ter bepaling van de hoeveelheid lucht die stromend water kan afvoeren.

Bedoelde formules zijn alle opgezet voor een stationaire situatie.

De formules zijn die van:

$$1 \text{ Casteleyn} \quad q_L = m' v_b^{5.6} \quad (25)$$

waarbij m' als functie van h_a wordt ontleend aan figuur 7

$$2 \text{ Casteleyn} \quad q_L = \alpha_c (v_b - v_c)^3 \quad (26)$$

waarbij α_c als functie van h_a wordt ontleend aan figuur 8

$v_c = \text{min. snelheid nodig voor luchttransport}$

$v_c \approx 0,8 \text{ m/s}$

$$3 \text{ Thomas} \quad q_L = \frac{q_w}{40} (F_r - 1) (1 - v_c/v_b)^2 (1 - \frac{1}{3} v_c/v_b)^{-1} \quad (27)$$

$v_c \approx 1,0 \text{ m/s}$

$F_r = v_b / \sqrt{gd_b}$

$d_b = \text{dikte waterlaag op insluitpunt}$

$$4 \text{ Ervine Ahmed} \quad q_L = 0,00045 (v_b - 0,8)^3 * \alpha_E \quad (28)$$

waarbij α_E aangeeft welk gedeelte van de ingesloten lucht wordt getransporteerd, zie figuur 9

$$5 \text{ Ervine} \quad q_L = KF_r^2 (1 - \frac{v_c}{v_b}) (1 - \frac{v_r}{v_o}) * q_w \quad (29)$$

$v_c = \text{min. snelheid, waarbij lucht wordt ingesloten}$

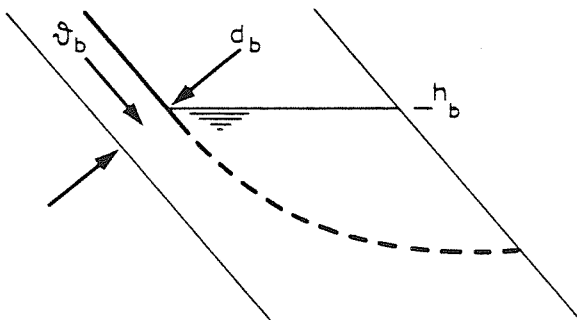
$v_r = \text{min. snelheid, waarbij nog lucht wordt getransporteerd}$

$K = 6 * 10^{-3}$

$v_o = \text{uitlaatsnelheid (} v_{gem} \text{)}.$

In bijlage 5 worden de formules (27), (28) en (29) nader omschreven, voor formules (25) en (26) wordt verwezen naar [3].

Alle bovenstaande formules geven de luchtdebieten als functie van de snelheid v_b op het insluitpunt. Voorlopig wordt het insluitpunt gedefinieerd als het snijpunt van de (horizontale) waterspiegel in het benedenbeen h_b en de inkomende straal (zie fig. 3.11).



v_b is in het modelonderzoek bepaald uit op foto's gemeten waarden voor d_b zodat

$$v_b = Q/(b d_b) \quad (30)$$

Figuur 3.11

Deze d_b is als functie van ΔH en h_a in figuur 10 gegeven en zal zo mogelijk gecontroleerd worden.

Helaas kan d_b niet rechtstreeks tijdens de prototypeproeven bepaald worden omdat visuele waarneming uitgesloten is.

In bijlage 6 worden enkele methodes aangegeven ter bepaling van d_b resp. v_b .

3.3.2 Aanslaan

Voor het geval dat de luchtkamer geschematiseerd kan worden tot een cilinder is voor aanslaan een wiskundige beschrijving mogelijk. Hiermee kan indien de luchtpompkapaciteit K konstant is, de aanslagtijd T bepaald worden. Eveneens is de bepaling van K mogelijk als de aanslagtijd bekend is.

Bijlage 4 geeft deze wiskundige beschrijving voor het geval dat de hevelknie een cilinder is. Nu wijkt de vorm van de hevelknie nogal af van een cilinder, bovendien is de luchtpompkapaciteit niet voor alle waarden van de druk konstant. Daarom is tijdens de voorstudie een kwasi-statisch rekenmodel opgesteld waarmee aanslaan (en zelf aanslaan) beschreven kan worden. Per tijdstap worden hierin bepaald: de positie van de waterspiegels in de hevelbenen, het wateroppervlak, de druk in de kroon, het volume van de luchtkamer en de grootte van

het wateroppervlak.

Dit rekenschema wordt in bijlage B.4.2 beschreven.

De meeste hierbovengenoemde parameters die per tijdstap nodig zijn worden aan het modelonderzoek M1347-M1348 ontleend.

Mocht de overeenkomst tussen model en prototype gering zijn dan is daarmee deze berekening problematisch geworden!

Ook wordt de mogelijkheid aangegeven de hoeveelheid lucht, die door het stromende water zelf wordt afgevoerd, te verdiskonteren. Hierbij dienen nog meer gegevens aan model te worden ontleend: namelijk ook de Q en de v_b (of d_b). Vervolgens kan met één van de luchtdebietformules bepaald worden welke hoeveelheid lucht wordt afgevoerd.

Op soortgelijke wijze is ook zelf aanslaan te beschrijven. Bedacht moet worden dat de luchtdebietformules zijn opgezet voor stationaire situaties. Bij zelf aanslaan is het stroombeeld in de knie nog niet volledig ontwikkeld (de neer is minder duidelijk aanwezig) waardoor minder lucht zal worden afgevoerd dan in de vergelijkbare stationaire situatie.

Door het rekenmodel in "omgekeerde richting" te gebruiken kan mogelijk uit de stijging van de waterspiegels, de verandering van het luchtkamervolume, worden afgeleid wat de hoeveelheid afgevoerde lucht is. Deze luchtdebieten kunnen worden vergeleken met de luchtdebieten die in overeenkomstige situaties bij stationaire stroming worden afgevoerd. Op deze wijze is het mogelijk het dynamische gebeuren (bij zelf aanslaan) te vergelijken met het stationaire gebeuren.

Door vergelijking van de resultaten van bovenstaande benaderingen met overeenkomstige prototypeproefresultaten moet de mate van betrouwbaarheid van de benadering blijken.

3.3.3 Afslaan

In de voorbereiding is voor afslaan bij "stilstaand water" (dus $\Delta H = 0$) een rekenmodel opgezet. Dit resulteerde in een derde orde niet-lineaire differentiaalvergelijking, die alleen numeriek is op te lossen. Uit kostenoverwegingen is de oplossing nog niet gegenereerd.

4 Verloop van het uitgevoerde onderzoek

4.0 Algemeen

Een overzicht van de uitgevoerde proeven geeft Bijlage 9.

Zoals het draaiboek (notitie DDWWO 83-20-007) aangeeft werden 8 à 10 meetdagen verwacht, die als volgt waren ingedeeld:

- 1e dag proefdraaien
- 2e-4e dag stationaire stroming
- 5e dag volledig aangeslagen
- 6e dag afslaan
- 7e-8e dag reserve
- 9e-10e dag meerdere kokers.

Door zeer uiteenlopende oorzaken is hiervan sterk afgeweken.

De voornaamste oorzaken van deze afwijking waren:

- 1) De grote luchtinsluiting ter plaatse van de kokerinstroming (waarvan de a.d.m. zeer veel hinder ondervond).
- 2) Weersomstandigheden, krachtige tot stormachtige wind zorgde voor gering verval over de hevel en onbetrouwbare luchtdebietmetingen.
- 3) Herhaalde aanpassing c.q. reparatie van meetapparatuur.
- 4) Aanbrengen van objecten ter voorkoming van luchtinsluiten.

De luchtinsluiting heeft vergaande konsekventies voor de luchtdebietmetingen, nodig voor de bepaling van de luchttransportkapaciteit van stromend water. Immers het door het meetsysteem gemeten luchtdebiet is maar een deel van de door het water afgevoerde lucht.

Voor het beheer zijn de konsekventies minder ernstig; al is het zo dat de meegevoerde lucht: 1) de afvoerkapaciteit van de hevel vermindert, 2) de aanslag-tijd vergroot (zie hiervoor 4.2.1), 3) de debietmeting via de a.d.m. soms onmogelijk heeft gemaakt, 4) de nauwkeurigheid van de debietmeting vermindert.

De opzet van de metingen was dusdanig dat aanvankelijk van elk verval $\Delta H = H_1 - H_3 \approx 0$ gebruik werd gemaakt voor een afslagproef om zo spoedig mogelijk een indruk te krijgen van de grootte van de benodigde afsluiteropeningen.

Hieronder wordt allereerst de uitvoering van de proeven globaal beschreven waarna de luchtinsluiting en de weersomstandigheden belicht worden.

4.1 Uitvoering prototypeproeven

Vergelijking van het uitgevoerde proevenprogramma met het oorspronkelijke schema leert dat de eerste 3 dagen van het uitgevoerde programma alleen gegevens (overigens waardevolle!) hebben opgeleverd met betrekking tot aan- en afslaan. De debietmeting liet het hier geheel, de kelkbakens gedeeltelijk afweten, zodat stationaire proeven "zinloos" waren.

Na de vierde dag werkte de debietmeter bij kleine debieten (vervallen). Luchtinsluiten bij grotere vervallen maakte debietmeting voorlopig onmogelijk, hoewel de a.d.m. bij kleinere vervallen wel een debiet aangeeft, kan ook hier een afwijking veroorzaakt zijn door de luchtinsluiting.

Door een geïmproviseerde Ott-molen opstelling is gepoogd ook grotere debieten te meten. Deze molenopstelling is op de 5e dag voor het eerst gebruikt met wisselend succes. (Hij raakte nogal eens verontreinigd.)

De kelkbakens werkten vanaf de 5e dag voor waarden van $h_a > 2,50 \text{ m} + \text{NAP}$ "korrekt" (zie later).

Om tijd te kunnen winnen werden op de eerstvolgende dagen (4 t/m 7) situaties met volledig aangeslagen hevel en met stationaire stroming afwisselend doorgeten. Herhaaldelijk zorgde nu sterke westenwind ervoor dat het verval gering bleef en de luchtdebietmeting bovendien extra onbetrouwbaar was.

Een veel groter probleem bleef de luchtinsluiting bovenstrooms. Als remedie werd gestroomd met 3 of 6 hevels waardoor de aanstroming wat beter was en er dus minder lucht werd ingeslagen dan bij 1 koker. Het aanbrengen van schotbalken (op 8e dag) tot even onder de waterspiegel bestreed dit luchtprobleem nauwelijks en deze werden weer verwijderd evenals de beide schotbalkondersteuningsnaalden (een bron van luchtinsluiten op zich!)

De extra meetdagen (11 en 12) zijn erg waardevol gebleken omdat de debietmeter nu goed funktioneerde, terwijl redelijke vervallen werden bereikt. Wel is de luchtdebietmeting om de hoge windsnelheid (windkracht 6-8) nog minder betrouw-

baar.

Het op deze dagen aangebrachte plafond dat luchtinsluiting moest voorkomen funktioneerde als zodanig goed maar moest bij grote vervallen worden verwijderd. Het werd te sterk naar beneden gezogen.

Het plafond was een werkvlot (5 x 3 m) van Direktie Zeeland (oorspronkelijk een drijfraam van de in de Brouwersdam opgenomen caissons). Hierop was met behulp van regels en platen een gedeelte bevestigd, dat de waterspiegel tussen de tussenwanden van meetkoker 2 afdekte, als het vlot dwars voor de koker werd gelegd.

4.2 Luchtinsluiting

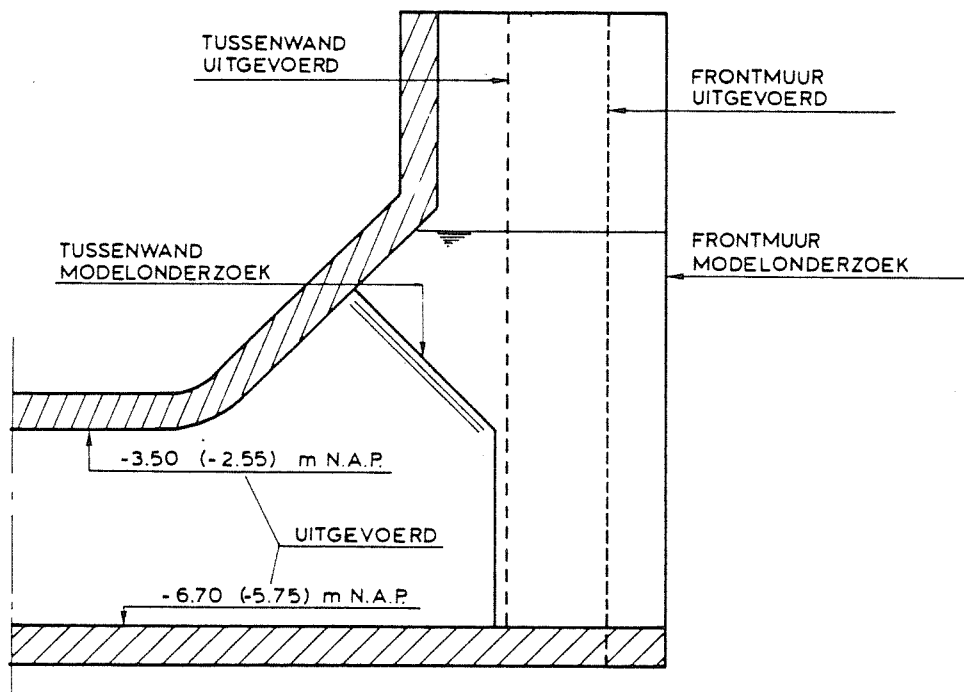
Bij prototypemetingen zijn proeven, met behulp waarvan het luchttransporterend vermogen van de stroming bepaald zou moeten worden, niet mogelijk gebleken.

Bovenstrooms van de konstruktie is ter plaatse van de inlaat zeer veel lucht ingesloten. Deze lucht is voor een deel in de knie van de hevel "ontsnapt" en wordt vervolgens weer in het benedenbeen in het water ingesloten en in benedenstroomse richting getransporteerd.

Dit is de voornaamste oorzaak van het feit dat in stationaire situaties de hoeveelheid lucht gemeten door het luchtmeetsysteem onvoldoende informatie geeft over de transportkapaciteit van water. De resultaten vertonen ook erg veel spreiding (door de wind?).

Dat zoveel lucht wordt ingeslagen mocht achteraf op grond van modelonderzoek M1331 verwacht worden:

- 1) de afrondingsstraal is te klein $R \approx 1,00$ i.p.v. 2,50 m
- 2) pijlers (tussenwanden) te ver doorgevoerd bovenstrooms en ook tot boven de waterspiegel
- 3) I profielen ter ondersteuning van de schotbalken creëren extra neren
- 4) bodem (en plafond) van de konstruktie liggen 1 m hoger dan in model! (zie fig. 4.1)



Figuur 4.1

Door luchtinsluiting zijn ook een deel van de problemen met de debietmeter verklaarbaar. Vanaf een bepaald luchtpercentage werkte de a.d.m. namelijk niet meer.

Daarnaast is de meting die "wel gelukte" onbetrouwbaarder.

Immers ter plaatse van de a.d.m.-meetraai is de snelheid hoger (bij een bepaalde Q) in een situatie met lucht dan (bij een zelfde Q) zonder lucht. Hieruit volgt een te grote Q bij de situatie met lucht. (De afwijking kan groter zijn dan het luchtpercentage!)

Meer dan deze kwalitatieve beschouwing is voorlopig niet mogelijk omdat het percentage lucht evenals de verdeling over de hoogte onbekend zijn. (Zie paragraaf 5.1.1.4.)

4.3 Weersomstandigheden

Het is vooral de veelvuldig voorkomende krachtige tot stormachtige wind geweest die heeft veroorzaakt dat het max. verval kleiner bleef dan 1,50 m.

Ondanks het feit dat in de gehele meetperiode 2x springtij is voorgekomen.

Dit is daarom zo jammer omdat de werking van de zigzag debietbegrenzer niet gecontroleerd kon worden aan de hand van een volkomen overlaatsituatie, deze treedt immers volgens modelonderzoek eerst op bij een $\Delta H = \pm 1,90$ m.

Luchtdebieten zijn bij krachtige-stormachtige wind eveneens minder betrouwbaar omdat het verschil in druk in de kelk en die in de atmosfeer hierdoor aanzienlijk beïnvloed wordt.

Ofschoon de korrektiefaktor afhankelijk is van de verhouding windsnelheid (snelheid in de kelk), en deze bekend is, is de correctie moeilijk uitvoerbaar omdat de stormachtige wind gekenmerkt werd door windvlagen met onbekende snelheid.

5 Resultaten van de prototypeproeven

5.0 Algemeen

Per onderdeel (voor het beheer, modelverifikatie of toekomstig ontwerp) en per facet, zoals in hoofdstuk 2 aangegeven, worden hieronder de meetresultaten, de analyse ervan en zo nodig de konklusies hieromtrent weergegeven. Deze resultaten worden hoofdzakelijk grafisch gepresenteerd volgens de relaties, die in [13] reeds waren verstrekt. Bijlage 3 geeft een overzicht van deze relaties.

Voor zover meetgegevens zijn verzameld met de "datalogger" zijn deze getabelleerd weergegeven en wel in:

tabel 1, 2 en 3 de stationaire proeven met 1, 3 en 6 hevels
tabel 4, 5 en 6 proeven met volledig aangeslagen situatie
tabel 7 aanslagproeven
tabel 8 afslagproeven
tabel 9 zelf aanslaanproef.

5.1 Resultaten van belang voor het beheer

5.1.0 Algemeen

Deze resultaten zijn al in een eerder stadium gerapporteerd in een notitie R1892-II [13] en worden hieronder grotendeels ongewijzigd gegeven per stromingssituatie die in dit kader van belang zijn.

5.1.1 Volledig aangeslagen

5.1.1.1 Afvoerkapaciteit

Beschrijving meetresultaten $Q-\Delta H_{1-3}$

De $Q-\Delta H$ relatie is bepaald door gedurende een half getij op een aantal tijdstippen (bij diverse ΔH 's dus) de Q te meten. Bij de bepaling van $\Delta H = \Delta H_{1-3} = H_1 - H_3$ deed zich het probleem voor dat de informatie, die de Histospaal op de Krammer leverde, niet korrekt bleek. Uit vergelijking van gegevens van de

Histospalen, de borrelbuizen en van ter plaatse aangebrachte peilschalen, blijkt dat de Histospaal aan de Krammerzijde een peil aangeeft dat $\pm 0,07$ m te hoog is. (Deze waarde varieert van 0,05 tot 0,11 m.) Dit verschil van 0,07 m wordt voor een deel veroorzaakt doordat de Histospaal-registraties in feite 2 min. te laat binnen komen. (Een door de "unit" ontvangen signaal is 2 min. eerder gemeten.) Hierdoor wordt al 0,03-0,04 m verschil verklaard. Bij de verdere presentatie en analyse wordt de waarde van 0,07 m aangehouden. De ΔH uit de registraties is met deze waarde gekorrigeerd.

Zoals reeds is opgemerkt, is bij een of twee kokers in bedrijf en grotere vervallen de a.d.m. niet in staat gebleken debieten te meten vanwege de luchtin-sluiting. Hier is zo goed mogelijk gebruik gemaakt van de Ottmolen-registraties.

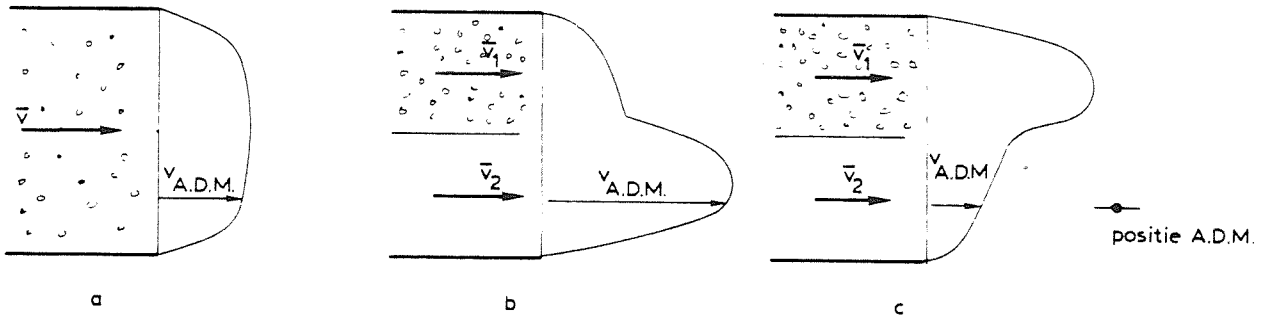
Daarnaast heeft luchtin-sluiting ook een konsekwentie voor de grootte van het gemeten debiet indien de a.d.m. wel werkt.

Invloed luchtin-sluiting

Zou de lucht gelijkmatig over de hoogte verdeeld zijn, dan zal hierdoor het profiel van de snelheidsverdeling nauwelijks worden beïnvloed. De watersnelheid (en evenzo de debietaanwijzing van de a.d.m.) zal, afgezien van enige invloed door kompressie, toenemen met een percentage dat overeenkomt met het luchtpercentage (fig. 5.1a).

Zou er echter sprake zijn van een "tweelagen-systeem", waarbij in de bovenlaag veel en in de onderlaag geen of weinig lucht is ingesloten dan gaat het snelheidsprofiel wel sterk afwijken van dat bij situatie zonder lucht (fig. 5.1b of 5.1c).

Het dichtheidsverschil over de lagen geeft namelijk aanzienlijke snelheidsverschillen tussen deze lagen. Hierdoor zijn debietaanduidingen mogelijk waarbij de fout veel groter is dan het luchtpercentage omdat de a.d.m. de snelheid bepaalt in het onderste deel van de koker.



Figuur 5.1

Indien wordt aangenomen dat het luchtpercentage 1% bedraagt, dan is de fout in de Q-bepaling in situatie a): 1%. In situatie b) en c) volgt die uit onderstaande overwegingen:

$$\Delta v = \bar{v} - \bar{v}_1 \quad (= \bar{v} - \bar{v}_2) \quad (31)$$

Δv = snelheidsverschil

\bar{v} = gem. snelheid over totale hoogte

$\bar{v}_{1,2}$ = gem. snelheid in boven- resp. onderlaag.

Nu geldt voor een aantal situaties bij een tweelagen-systeem:

$$\Delta v = \sqrt{\epsilon g d} \quad (32)$$

ϵ = relatief dichtheidsverschil

$$= \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho}$$

d = kokerhoogte.

Voor een situatie in de hevel met 1% lucht en dus 2% lucht in de bovenste laag is ϵ :

$$\epsilon = \frac{1000 - 980}{1000} = 0,02$$

zodat

$$\Delta v_2 = \bar{v} \pm \sqrt{0,02 \cdot g \cdot 3,2} = \bar{v} \pm 0,78$$

Bij $Q = 40 \text{ m}^3/\text{s}$ ($\bar{v} = 4 \text{ m/s}$), betekent dit voor de fout in de v (Q -)bepaling:

$$r_v = \pm \frac{0,78}{4} * 100\% = \pm 19,5\% .$$

Het is niet mogelijk zonder meer aan te geven of de situatie van figuur 5.b of 5.c zal optreden.

In de praktijk zal de fout in de Q tussen bovenstaande uitersten in liggen, dat wil zeggen tussen: +1% (situatie a) en + 19,5% (situatie b en c).

Gebruik Ottmolen

Door de Ottmolen voor lage debieten te ijken met de a.d.m. ontstaat de mogelijkheid ook grotere debieten te kunnen bepalen. Uitgangspunt is hierbij de aanname dat er een lineair verband bestaat tussen het aantal Ottmolen-omwentelingen en de grootte van Q . (Het stroombeeld moet dan onafhankelijk van de Q zijn.)

Helaas werd het goed functioneren van de Ottmolen sterk beïnvloed door verontreinigingen in het water (zeewier, gras etc.).

Bij de situatie met 2 kokers is de informatie van de Ottmolen vermoedelijk om deze reden zeer onbetrouwbaar gebleken. Voor een groot deel zelfs geheel afwezig (terwijl ook de a.d.m. het hier liet afweten). Toch is een poging gedaan een Q - ΔH -relatie aan te geven. Omdat een ijking van de Ottmolen-registraties aan die van de a.d.m. onmogelijk was is in de relatie

$$Q = k O \tag{1}$$

O = aantal Ottmolen-omwentelingen

k = evenredigheidskonstante

voor k een waarde genomen die ligt precies tussen die voor k bij 1 en k bij 3 kokers in bedrijf.

Bijlage 7 geeft voor de situatie bij 1, 3 en 6 kokers de relatie tussen Ottmolen en debietregistraties.

Figuur 11 t/m 14 geven de Q - ΔH relaties voor 1, 2, 3 en 6 kokers. In figuur 15 kunnen deze relaties met elkaar vergeleken worden.

Bij een aantal punten is de Grevelingenwaterstand (H_1) aangegeven om na te kunnen gaan of de H_1 de afvoerkapaciteit beïnvloedt, tevens is aangegeven of de Q bepaald is met de Ottmolen of met de a.d.m. (de onderstreepte punten zijn met de Ottmolen bepaald). Van belang is ook dat de a.d.m. waarden geeft als of steeds 3 kokers in bedrijf zijn. (Voor konsekventies zie 5.1.1.3).

Omdat in de uiteindelijke beheerssituatie alleen waterstanden h_2 en h_4 (door de borrelbuizen) gemeten worden, moet de ΔH ($= \Delta H_{1-3}$) gerelateerd worden aan de ΔH_{2-4} .

Om deze reden zijn de relaties gegeven:

- a) $\Delta H_{1-3} - \Delta H_{2-4}$ (= ΔH van histospalen- ΔH borrelbuizen) van figuur 16, 17 en 18
- b) $Q - \Delta H_{2-4}$ (= debiet- ΔH borrelbuizen) van figuur 19, 20, 21 en 22.

Analyse $Q - \Delta H_{1-3}$ relatie

Uit alle figuren met $Q - \Delta H_{1-3}$ relaties (fig. 11 t/m 14) blijkt dat de invloed van een variatie in de H_1 op de $Q - \Delta H$ relatie gering is (H_1 heeft gevarieerd tussen -0,11 en -0,30 m NAP).

Een significante variatie kon niet worden vastgesteld.

Merkwaardig is het verloop van de $Q - \Delta H_{1-3}$ relatie voor twee kokers (fig. 12). Dit is waarschijnlijk te wijten aan de gebrekkige debietmeting. Op de bewuste meetdagen liet de debietmeter het namelijk geheel afweten. Zodat ijking van de Ottmolen niet mogelijk was. Daarbij kwam het probleem dat deze molen zeer schuin werd aangestroomd, en vermoedelijk was verontreinigd. Als eerste benadering voor de Ottmolen ijking is een waarde aangehouden die ligt tussen die voor één, respectievelijk drie kokers.

Bij stroming met 3 kokers is door middel van een drijvend plafond getracht de bovenstroomse luchtinsluiting te voorkomen. Bij kleine vervallen is dit inderdaad gelukt. De hierbij gemeten debieten lijken wat groter te zijn dan in de situatie zonder plafond (zie fig. 13). Een eerste globale schatting is dat de debieten 5 tot 10% groter zijn.

Wel is de overweging van bladzijde 43 en 44 van belang. De in dit water opgesloten lucht "veroorzaakt" een hogere snelheid van het water. Deze snelheids-toename is gering als de lucht gelijkmatig over de hoogte verdeeld is.

Een aanzienlijk grotere snelheidstoename is mogelijk bij een tweelagen-sy-

steem, waarbij in de bovenste laag een veel groter percentage lucht is ingesloten dan in de onderste laag (zie formule (32)). De grafiek voor Q (met lucht) in figuur 11 is dan te hoog.

Het verschil in debiet door 1, 3 en 6 kokers is zoals uit figuur 15 blijkt erg gering. De krommes voor 1 en 6 kokers liggen zelfs nagenoeg op elkaar. Het debiet bij drie kokers is iets hoger. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat bij 6 kokers in bedrijf de bovenwaterstand h_1 aanzienlijk lager was dan bij de meting voor de drie kokers (-0,30 m tegen -0,16 m). Zodoende kon bij zes kokers meer lucht worden meegevoerd vanaf de instroming en dus is de Q_w kleiner dan bij 3 kokers als gevolg van de grotere weerstand (het optreden van een tweelagen-stroming nivelleert deze invloed weer).

Verder is van belang dat h_3 (waterstand Krammer) is opgevat als energiehoogte. Bij grotere debieten ($Q = 40 \text{ m}^3/\text{s}$ per koker) is de snelheidshoogte ter plaatse van de Histospaal al $\approx 0,03 \text{ m}$. De feitelijke ΔH is zodoende $0,03 \text{ m}$ kleiner.

Belangrijk: Bovenstaande is alleen betrokken op koker waarin gemeten is, namelijk koker 2. Voor de debieten door de overige kokers zie paragraaf 5.1.1.3.

Konklusie $Q-\Delta H_3$ relatie

Bovenstaande leidt tot de overweging voor alle gevallen dezelfde $Q-\Delta H_{1-3}$ relatie (die voor 6 kokers) aan te houden. De maximale afwijking zal dan 5% kunnen bedragen (afgezien van luchtaspekten en debietverdeling over de kokers).

Analyse $Q-\Delta H_{2-4}$ relatie

Uit figuur 16 t/m 18 blijkt dat het verval over de Histospalen (ΔH_{1-3}) niet gelijk is aan het verval over de borrelbuizen (ΔH_{2-4}). Bij 1, 3 en 6 kokers in bedrijf valt steeds dezelfde tendens te bespeuren: bij kleine vervallen is $\Delta H_{1-3} < \Delta H_{2-4}$; bij grote vervallen is $\Delta H_{1-3} > \Delta H_{2-4}$. Dit gedrag is een gevolg van de spiegelddaling, vooral in het benedenstroomse pand, die naarmate het verval (en dus het debiet) toeneemt, steeds meer invloed doet gelden.

Dit heeft voor de $Q-\Delta H_{2-4}$ relaties tot gevolg dat de grafiek voor kleine vervallen iets naar links en voor grotere vervallen iets naar rechts is "verschoven" ten opzichte van de relaties, zoals uit vergelijking van de figu-

ren 19 t/m 21 met 11, 13 en 14 blijkt.

Overigens verschillen de $Q-\Delta H_{2-4}$ relaties onderling opnieuw slechts erg weinig zoals uit figuur 22 blijkt. Deze beschouwing is betrokken op koker 2!

Konklusie $Q-\Delta H_{2-4}$ relatie

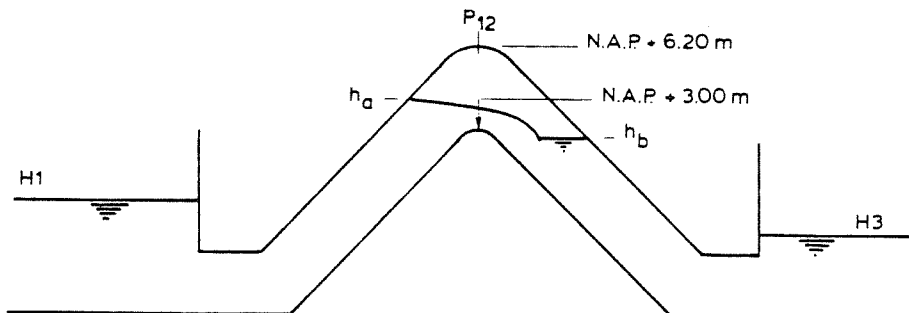
Het lijkt alleszins gerechtvaardigd om ook voor de $Q-\Delta H_{2-4}$ relatie voor de diverse aantallen kokers in bedrijf één en dezelfde grafiek te gebruiken (en wel die voor 1 of 6 kokers). De maximale fout bedraagt dan ongeveer 5%. (Weer afgezien van luchtaspekten en debietverdeling over de kokers.)

Druk-debietrelatie

Reeds is vermeld welke problemen zich met de debietmeting hebben voorgedaan. Ter controle is daarom het debiet weer gegeven als funktie van p_{kroon} , immers:

$$p_{12} + h_a - H_1 = p_{\text{atm}} - \alpha Q^2 \quad (33)$$

- p_{12} = abs druk in de kroon (p(abs)) in mwk
- h_a = waterspiegelniveau bovenbeen hier: $h_{\text{kroon}} = 6,20 \text{ m} + \text{NAP}$
- H_1 = waterspiegelniveau bovenstrooms (Grevelingen)
- p_{atm} = atmosferische druk in mwk.



Figuur 5.2

In figuur 23, 24 en 25 is $(p_{12} + h_a - H_1 - p_{\text{atm}})$ uitgezet tegen Q .

De is ontleend aan gegevens, verstrekt door het KNMI, gemeten te Zierik-

zee. De spreiding in de figuren wordt wellicht veroorzaakt doordat de drukmetingen van het KNMI en die in de hevel niet op elkaar zijn afgeijkt.

De waarden voor α zijn voor een aantal situaties berekend in tabel 10.

Een grafische weergave van de relatie waterspiegelafzinking (boven of benedenstrooms) - debiet: $\Delta H_{1-2} - Q$ of $\Delta H_{4-3} - Q$ gaf zoveel spreiding te zien, dat deze als niet zinvol wordt beschouwd.

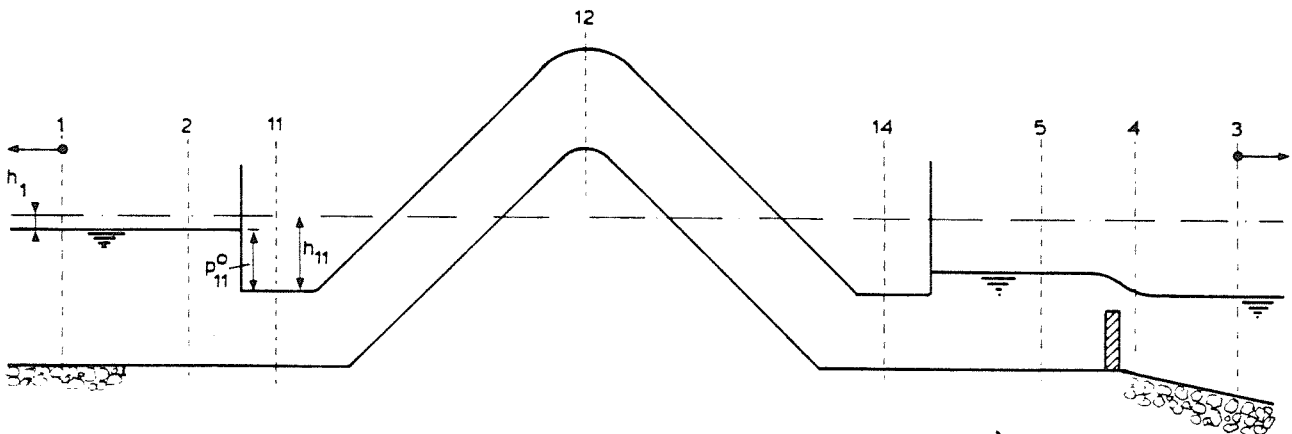
5.1.1.2 Energieverliezen

Gemeten verliescoëfficiënten

Om de verliezen in de diverse leidinggedeeltes te kunnen bepalen zijn de drukken op de in figuur 5.3 aangegeven posities bepaald voor 1, 3 en 6 kokers bij stilstaand water en volledige aangeslagen hevel. In tabel 10 zijn enkele situaties weergegeven.

De p_{12} is als functie van ΔH_{1-3} weergegeven in figuur 26, 27 en 28, de spreiding wordt veroorzaakt door de variatie in atmosferische druk en in de waterstand H_1 .

Op een wijze, zoals reeds in 3.1.1.2 is aangegeven, zijn hieruit de verliescoëfficiënten voor de verschillende leidingtrajekten berekend.



Figuur 5.3

Berekening van waarden voor ξ_{1-12} volgens de methode van formule (7) leverde veel te kleine waarden op.

Oorzaken hiervoor kunnen zijn: a) aannamen van potentiaalstroming (13) niet korrekt, b) positie van de drukopnemer niet exact op 6,20 m + NAP.

Daarom is ξ_{1-12} geschat uitgaande van ξ_{1-11} , ξ_{14-3} en ξ_{1-3} .

$$\xi_{1-3} = \xi_{\text{tot}} = \frac{\Delta H_{1-3}}{v^2/2g} \quad (34)$$

Voor ξ_{1-12} is nu aangenomen dat

$$\xi_{1-12} = \xi_{1-11} + \frac{\xi_{\text{tot}} - (\xi_{1-11} + \xi_{14-3})}{2} \quad (35)$$

of

$$\xi_{11-12} = \frac{1}{2} \xi_{11-14} = \frac{1}{2} (\xi_{\text{tot}} - (\xi_{1-11} + \xi_{14-3})) \quad (36)$$

Bovenstaande berekeningen zijn eveneens uitgevoerd in tabel 10. In figuur 29, 30 en 31 zijn ξ_{tot} (= ξ_{1-3}); ξ_{1-11} resp. ξ_{14-3} uitgezet als functie van ΔH . De ξ_{totaal} blijkt voor de kleinere waarden van ΔH van ΔH afhankelijk, zoals in figuur 29 is te zien: de ξ_{tot} neemt toe bij kleiner wordende ΔH . Fysisch gezien lijkt dit evenwel zeer onwaarschijnlijk. Wel dient hierbij overwogen te worden dat de metingen bij kleine vervallen onnauwkeurig zijn. Verder is het waarschijnlijk dat bij kleine vervallen het uittreeverlies groter is dan bij grotere vervallen (door de hogere benedenwaterstand is er dan minder terugwinnen van energie).

Konklusie ξ (gemeten)

Heel globaal geldt voor $0,6 < \Delta H < 1,6$

$$\xi_{1-11} \approx 0,75$$

$$\xi_{11-12} \approx 0,325$$

$$\xi_{12-14} \approx 0,325$$

$$\xi_{14-3} \approx 0,60$$

$$\xi_{1-3} \approx 2,00$$

Voor drie kokers is $\xi \approx 1,8$ (voor $\Delta H > 1$). Voor zes kokers is $\xi \approx 1,9$ (voor $\Delta H > 1$).

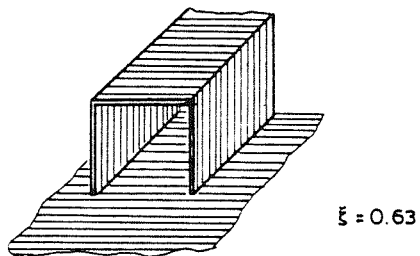
Vergelijking met berekende verliescoëfficiënten en modelonderzoek

Voor de koker 2 kan met behulp van literatuur [14] worden bepaald wat de ξ -waarden zijn voor de verschillende onderdelen, te weten: instroom- (ξ_i) bocht- (ξ_b) wrijvings- (ξ_w) en uittreeverliezen (ξ_u).

Uitgangspunt bij onderstaande berekening is dat $Q = 32,5 \text{ m}^3/\text{s}$ per koker bij $\Delta H = 1 \text{ m}$.

Intreeverlies

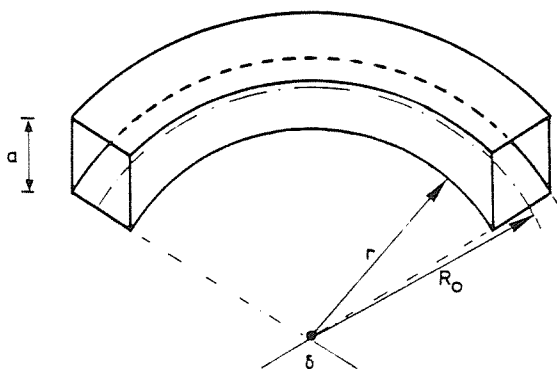
Literatuur [14] geeft aan dat voor een geometrie volgens figuur 5.4 de $\xi_i = 0,63$.



Figuur 5.4

Bochtverliezen

De hevelleiding heeft twee bochten met $\delta = 45^\circ$ en één met $\delta = 90^\circ$, zie figuur 5.5 voor symbolen.



Figuur 5.5

Nu geldt dat:

$$\xi_b = k_\Delta k_{Re} \xi_m \quad [14] \quad (37)$$

waarbij

$$\xi_m = A_1 \cdot B_1 \cdot C_1 \quad (38)$$

Zie ook bijlage B.8.4.

Hier is $A_1 = 0,6$ (voor $\delta = 45^\circ$ en $A_1 = 1$ voor $\delta = 90^\circ$)

$$B_1 = 0,17 \text{ (voor } \frac{R_e}{D_H} = 1,44) \quad D_H = a_o \text{ (hydraulische diameter)}$$

$$C_1 = 1 \text{ (voor } a_o/b_o = 1)$$

$$k_\Delta = 1,3 \text{ (voor } R_e = 0,96 * 10^6 \text{ en } \bar{\Delta} = \frac{\Delta}{D_H} = \frac{1 * 10^{-3}}{3.2} = 0,0003)$$

$$k_{Re} = 1 \text{ (voor } R_e = 0,96 * 10^6) \quad \Delta = \text{betonruwheid (1 mm)}$$

$$\text{Dus } \xi_{b45^\circ} = 0,6 * 0,17 * 1 * 1,3 * 1 = 0,13$$

$$\xi_{b90^\circ} = 1 * 0,17 * 1 * 1,3 * 1 = 0,22$$

$$\text{Dus } \xi_{b_{\text{tot}}} = 2 \xi_{b45^\circ} + \xi_{b90^\circ} = 0,48$$

Het wrijvingsverlies

Dit verlies bedraagt

$$\Delta H_w = \lambda \frac{1}{D_H} \frac{v^2}{2g} = \xi_w \frac{v^2}{2g} \quad (39)$$

$l =$ totale kokerlengte ≈ 80 m

$$\text{Uit } Re = \frac{v \cdot D_H}{\nu} = 0,96 * 10^6 \text{ en } \bar{\Delta} = 0,0003 \text{ volgt:}$$

dat $\lambda = 0,015$ en

$$\xi_w = \lambda \frac{1}{D_H} = 0,015 * \frac{80}{3 \cdot 2} = 0,38$$

Totale verlies

Bij $Q = 32,5$ m/s geldt dus:

$$\Delta H = (\xi_i + \xi_b + \xi_w + \xi_u) \frac{v^2}{2g} \quad (40)$$

of

$$\Delta H = 1 \text{ m} = (0,63 + 0,48 + 0,38 + \xi_u) \frac{v^2}{2g}$$

$$\rightarrow \xi_u = \frac{1}{\frac{v^2}{2g}} + 1,49 \quad \left(\frac{v^2}{2g} = 0,51 \right)$$

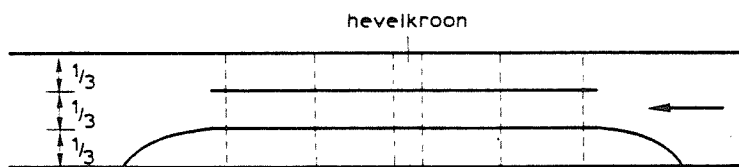
$\xi_u = 0,47$ (Dit is het eigenlijke uittreeverlies in de woelbak + verlies over de begrenzer)

Door de woelige waterstand in de woelbak was het "echte" uittreeverlies niet te meten.

Vergelijking met modelonderzoek leert dat intree- en uittreeverliezen in het modelonderzoek zijn onder- respectievelijk overschat (zie onderstaand overzicht).

De oorzaak hiervan is de afwijkende geometrie. In model is slechts 1 koker aanwezig (en wel koker 1 of 6 van figuur 1). De gootbreedte boven- en benedenstrooms is $\pm 3x$ de kokerbreedte; met de grote afrondingsstraal (fig. 5.6) zal er een gering instroomverlies optreden.

Het ontvangende water zorgt in model voor een veel grotere spreiding dan in prototype (zeker bij 3 of 6 kokers)



Figuur 5.6

waardoor in model minder energie wordt teruggewonnen.

Daarnaast is de ruwheid in prototype wat groter dan in model (0,34 tegen 0,10).

Konklusie ξ (gemeten, berekend en uit model)

Op grond van een vergelijking van de berekende ξ -waarden met de gemeten ξ -waarden, lijken de gemeten waarden alleszins redelijk. Zoals uit onderstaand overzichtje moge blijken.

Tabel 5.1

Verliescoëfficiënt	Gemeten (tabel 1) o)	Berekend	model M1347 M1348 ^{oo})
ξ_{tot}	2	$1,49 + \xi_u = 1,96$	1,50
ξ_{1-11}	0,75	$0,63 + \frac{30}{80} * 0,38^1) = 0,81$	0,16
ξ_{11-12}	0,33	$0,13^2) + 0,11^2) + 0,07^1) = 0,31$	0,43
ξ_{12-14}	0,33	$0,13^2) + 0,11^2) + 0,10^1) = 0,34$	
ξ_{14-3}	0,6	$\xi_u + \frac{10}{80} * 0,38^1) = 0,51$	0,91

- Opmerking: o) deze waarden zijn globale gemiddelden
 oo) door afwijkende kokerlengtes niet zonder meer vergelijkbaar
 1) wrijvingsverlies
 2) bochtverlies.

N.B. Bovenstaande beschouwingen zijn betrokken op koker 2.

5.1.1.3 Relatie afvoer door koker 2 en die door de overige kokers

Uit gegevens, verstrekt door RWS, Waterbeheer en Waterkwaliteit, dienst Hydro Instrumentatie, blijken de volgende debietverhoudingen:

ruwheid (wand)	Q_m / Q_t
glad	0,329
ruw	0,334
gemiddeld	0,332

Q_m = debiet door middelste koker (2)

Q_t = debiet door alle kokers (1, 2 en 3)

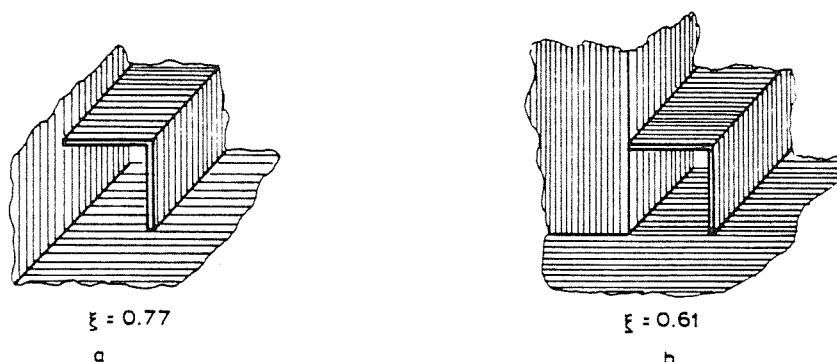
Deze gegevens zijn ontleend aan het bij TNO uitgevoerde modelonderzoek [11], waarbij 3 kokers in model aanwezig waren.

Bij alle beproevingen waren deze 3 kokers in bedrijf. Op grond van dit modelonderzoek zou dus verwacht mogen worden dat alle kokers evenveel afvoeren.

Gezien (de overigens schaarse) gegevens, betreffende de geometrie van de hevels, die het bewuste rapport verstrekt, mag worden verondersteld, dat ook in dit model de aanstroomcondities wat gunstiger zijn dan in de situatie van de gebouwde Flakkeese spuisluis, vooral die van koker 1 en 3.

Het lijkt waarschijnlijk, juist uit overwegingen betreffende de geometrie, dat de debieten van de diverse kokers niet identiek zijn. Dit zal vooral zo zijn indien niet alle kokers tegelijk afvoeren.

Zo ligt het in de verwachting dat koker 1 (zie fig. 1), als deze alleen afvoert, een grotere intreeverliescoëfficiënt zal hebben dan koker 2. De instroomkonstruktie van 1 lijkt gedeeltelijk op die van figuur 5.7a) én b). Voorlopig wordt $\xi_{i1} = 0,69$.



Figuur 5.7

Koker 3 alleen lijkt sterk op die van figuur 5.7b) dus $\xi_{i3} = 0,61$.

Dit zou betekenen als $\xi_2 = 1,96$ dat:

$$\xi_1 = 1,96 + (0,69 - 0,63) = 2,02$$

$$\xi_3 = 1,96 + (0,63 - 0,61) = 1,94$$

Is koker 1 of 3 alleen in bedrijf dan is het debiet door deze koker dus:

$$Q_1 = Q_2 \sqrt{\xi_2 / \xi_1} = 0,99 Q_2$$

$$Q_3 = Q_2 \sqrt{\xi_2 / \xi_3} = 1,01 Q_2$$

Ook in deze situatie verschillen de debieten per koker dus maar zeer weinig.

Werken meerdere kokers samen dan is de aanstroming vooral aan de zijde van de eveneens werkende koker(s) beter, en zal het debiet per koker hierdoor groter kunnen zijn dan indien deze alleen werkte. Doordat het uitstroomverlies evenwel ook toeneemt wordt deze "winst" weer grotendeels teniet gedaan (er is nauwelijks verschil tussen debiet bij 6 werkende kokers en slechts één werkende koker terwijl het debiet bij 3 werkende kokers wel wat hoger is).

5.1.1.4 Nauwkeurigheid debietmeting

De onnauwkeurigheden in de debietmeting worden door vele factoren bepaald.

- 1) Systeemgebonden onnauwkeurigheden.
- 2) Afwijkingen in het ontwerp van de hevel, die niet in het onderzochte model zijn verwerkt.
- 3) Luchtinsluiting.

1) Systeemgebonden onnauwkeurigheden (σ_1)

Deze zijn door RWS Hydro Instrumentatie opgegeven als

$$4,5\% \pm 0,45 \text{ m}^3/\text{s} \text{ alleen voor het middenkanaal}$$
$$4,5\% \pm 2,5 \text{ m}^3/\text{s} \text{ voor alle kanalen samen}$$

Dus $\sigma_1 = \pm 4,5\%$.

2) Onnauwkeurigheden door geometrie-afwijkingen (σ_2)

Door deze afwijkingen zullen de debieten door koker 1 en 3 enigszins afwijken van de op modelonderzoek gebaseerde verwachting.

Uit 5.1.1.3 is evenwel gebleken dat deze afwijkingen zich tot 2% beperken; dus $\sigma_2 = \pm 2\%$.

3) Onnauwkeurigheden door luchtinsluiting (σ_3)

De afwijkingen die hierdoor ontstaan zijn wel zeer moeilijk te kwantificeren. Zoals in 5.1.1.1 is betoogd, is behalve de hoeveelheid lucht die wordt meegevoerd, ook van belang hoe deze hoeveelheid over de hoogte van de hevelkoker is verdeeld.

De volgende overwegingen zijn van belang:

- I) Een gelijkmatig verdeelde hoeveelheid lucht geeft een debietafname gelijk aan het luchtpercentage (situatie a van fig. 5.1).
- II) Een afvoer die gelijk is op een tweelagen-systeem met lucht in de bovenste laag en nagenoeg geen lucht in de onderste laag geeft een veel sterkere debietafwijking (extreem situatie b of c). Een betere formulering: de debietmeting via de a.d.m. overschat of onderschat het debiet veel sterker (mogelijk: 5 tot 10%).
- III) Meting van het debiet bij een situatie met een plafond dat luchtinsluiting voorkwam, leerde dat het debiet met ongeveer 5 à 10% toenam ten opzichte van de situatie met luchtinsluiting.
Deze meting vond plaats bij een $\Delta H \leq 0,80$ zodat mag worden verwacht dat bij grote waarden voor ΔH (waarbij veel meer lucht wordt ingeslagen) het verschil in debieten toeneemt.

Wordt nu in de beschouwing betrokken, dat het debiet in de situatie met lucht (zeker bij een soort "tweelagen-systeem") over- of onderschat wordt (m.a.w.: overweging II en III gekombineerd) dan kan hieruit resulteren dat bij overschatting van het debiet (situatie van fig. 5.1b) $\sigma_3 = 10\%$ en bij onderschatting (situatie van fig. 5.1c) $\sigma_3 = 0\%$.

Samenvattend moet worden geconstateerd (als verondersteld wordt dat de "kwadratische voortplantingswet van de fouten" mag worden toegepast) dat de onnauwkeurigheid van de debietmeting in geval van overschatting bedraagt:

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2} = 11\%$$

In geval van onderschatting

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2} = 5\%$$

5.1.2 Aanslaan

5.1.2.1 Tijdsduur van aanslaan met de vakuumpomp

Meetresultaten (T- ΔH)

Onder de aanslagtijd T wordt verstaan de tijd die verloopt tussen het starten van de vakuumpomp (t_o) en het tijdstip (t_e) waarop de druk in de kroon "konstant" wordt (niet verder afneemt). Zie ook 3.1.2.1.

Deze tijden zijn uitgezet in figuur 32 als functie van het verval, terwijl is aangegeven hoeveel hevels en hoeveel pompen in bedrijf waren. (zie ook tabel 11.)

Nu zal in de normale bedrijfssituatie de pomp worden uitgeschakeld zodra de druk in de hoofdvakuumleiding tot 3,60 mwk (absoluut) is gedaald.

Dit zal betekenen dat de hevel later aanslaat dan berekend c.q. gemeten is. De laatste kolom van tabel 11 geeft een grove schatting van de totale aanslagtijd in deze bedrijfssituatie, gebaseerd op aanslaan met de pomp(en) tot $p_{12} = 5$ mwk in de kroon, en zelf aanslaan tot dat $h_a = 6,20 \text{ m} + \text{NAP}$.

Verder is van belang dat in de situatie van 1 hevel, aangeslagen door 1 pomp de positie van de waterspiegel in het bovenbeen (h_a) nog erg laag kan zijn als de druk in de vakuumleiding tot 3,6 mwk is afgenomen en de korresponderende druk in de kroon tot 5 mwk.

Tabel 12 geeft voor diverse waarden van H_1 en ΔH_{gem} de positie van h_a als de druk tot 5 mwk is afgenomen.

In de figuren 33, 34 en 35 is het verloop van de p_{12} , h_a en h_b aangegeven als functie van de tijd voor $\Delta H \approx 0$ voor 1 hevel en 1 pomp, voor 3 hevels en 2 pompen en voor 6 hevels en 3 pompen. In figuur 36, 37 en 38 zijn dezelfde si-

tuaties de relaties $p_{12} - h_a$ uitgezet.

Analyse en konklusie

Uit figuur 32 blijkt dat de invloed van het verval op de aanslagtijd erg klein is (zie punten voor pomp en 1 hevel). Wordt rekening gehouden met de h_1 (Grevelingen-waterstand) dan zou mogen worden gekonkludeerd dat bij een konstant verval ΔH aanslaan bij een lagere Grevelingen-stand meer tijd vergt dan bij een hogere terwijl voor een zelfde Grevelingen-stand aanslaan bij een groot verval langer duurt dan bij een klein verval (ook al omdat er van bovenstrooms lucht wordt aangevoerd).

Omdat de vakuumpomp wordt gestopt zodra de onderdruk in de vakuumleiding 3,60 mwk (absoluut) is, zijn de aanslagtijden wat langer omdat de "laatste" luchthoeveelheid door zelf aanslaan wordt geëvacueerd. Tabel 11 geeft deze waarden. Voor 1 pomp op één hevel geldt, als bij een druk van 3,60 mwk in de vakuumleiding of 5 mwk in de hevelkroon de pomp wordt gestopt, dat zelf aanslaan steeds moeizamer zal verlopen naarmate H_1 lager wordt en het verval toeneemt.

5.1.2.2 Tijdsduur van zelf aanslaan

Gemeten zelf aanslagtijden

Bij deze beproevingen is alle lucht uit de hevel geëvacueerd door het stromende water zelf, dus zonder van de luchtpompen gebruik te maken.

Van belang is de positie van de waterspiegel h_a op het begintijdstip en het verval.

Het tijdstip van volledig aangeslagen zijn, is weer het moment waarop de druk in de kroon konstant wordt.

Als functie van de ΔH en h_a (bij aanvang zelf aanslaan) zijn de tijden uitgezet in figuur 39.

Analyse en konklusie

Uit figuur 39 blijkt de invloed van ΔH en h_a op de tijd erg groot te zijn. Van belang is nog de overweging dat de luchtinsluiting bovenstrooms de aan-

slagtijd nadelig beïnvloed zal hebben. Immers ook deze lucht moet door het water worden afgevoerd.

Verder wordt de minimale voorwaarde uit het modelonderzoek, dat voor zelf aanslaan $h_a > 4,40$ m en $\Delta H > 0,35$ m moet zijn, niet zonder meer bevestigd. Bij $h_a = 3,80$ m en $\Delta H = 1,66$ m sloeg de hevel "zelf" aan in 9,5 min.

5.1.2.3 Luchtpompkapaciteit

Meetresultaten

Op de wijzen van 3.1.2.3 is de effectieve luchtpompkapaciteit (K_e) bepaald. Allereerst door een vergelijking van de druk in de vakuümleiding met die in de hevelkroon op hetzelfde ogenblik en de (theoretische) ijkcurve van de pomp. Deze methode is verricht aan de hand van figuur 41 tot en met 43 en 40 en resulteerde in capaciteiten die eveneens in figuur 40 zijn aangegeven, als functie van het aantal pompen en hevels en het verval.

Voor een aantal situaties zijn de capaciteiten bepaald met de in 3.1.2.3 aangegeven formules (17) en (22). Deze waarden zijn gegeven in tabel 13 waar deze eveneens worden vergeleken met de K_e volgens de eerste methode.

Analyse en konklusie

Uit de waarden gegeven in tabel 13 moge blijken dat de overeenkomst in de K -waarden, die op verschillende wijzen zijn bepaald, groot is.

In het gemeten bereik zijn deze waarden nauwelijks afhankelijk van de druk. Duidelijk is uit deze waarden de invloed van de weerstand van de vakuümleidingen af te leiden.

De effectieve luchtpompkapaciteit is bij:

1 pomp op 1 hevel $K_e = 0,28$ m³/s

1 pomp op 2 hevels $K_e = 0,37$ m³/s

3 pompen op 6 hevels $K_e = 0,35$ m³/s.

5.1.3 Afslaan

5.1.3.1 Tijdsduur van afslaan en grootte van beluchtingsopening bij afsluiter A

Allereerst werd gepoogd zo spoedig mogelijk de afsluiteropening van afsluiter A vast te stellen. Afsluiter A is de normale bedrijfsafsluiter die dus snel wordt geopend.

Na een aantal proeven bleek dat redelijk snel werd afgeslagen bij een verval van $\Delta H = \pm 0$ met een vlinderklepopening van 40%. Uit een berekening blijkt een opening van 40% in de "WL-meetopstelling" te corresponderen met een smoorflens met een opening van $\emptyset 75$ mm (bijlage 8).

Om meettechnische redenen is de opening tijdens de proeven bij $\Delta H \approx 0$ niet groter genomen, omdat dan wellicht de instrumenten (kelkbakens) gevaar liepen te worden beschadigd. De waterspiegels h_a en h_b in de hevelbenen zakten dan namelijk zeer snel; na een van deze proeven was zelfs een kelkbaak ontregeld. Bij grotere vervallen kon de afsluiteropening zonder problemen worden vergroot, zonder dat het water extreem snel zakte.

Omdat geen behoefte bestond aan "sneller afslaan" zijn inmiddels flenzen met een diameter van $\emptyset 75$ mm geïnstalleerd. Bij deze gekozen oplossing is geen doorslingeren van de waterstand ten opzichte van de Zijpestand h_2 te vrezen. Zodat geen gevaar bestaat voor hoge dynamische drukken (klappen) aan het plafond van het horizontale leidingdeel.

De tabel 14 geeft voor een aantal proeven de afslagtijd:

T_a) vanaf het openen van de beluchtingsafsluiter tot op het moment waarop de waterspiegel h_a de kruin bereikt (voor $h_a < 3,00$ m + NAP wordt geen debiet meer afgevoerd,

T_b) vanaf het openen van de beluchtingsafsluiter tot op het moment waarop de waterspiegels h_a en h_b het niveau van het buitenwater hebben bereikt.

Zowel T_a als T_b zijn aangegeven in figuur 44 als functie van ΔH .

Figuur 45 geeft het luchtdebiet en de p_{12} (de druk in de kroon) als functie van de tijd voor $\Delta H \approx 0$; figuur 46 voor $\Delta H = 0,70$ m.

Analyse en konklusie

De stellige indruk bestaat dat de opening $\emptyset 75$ mm voor normaal gebruik best

wat groter mag zijn. Met het oog op de geïnstalleerde apparatuur is dit evenwel niet beproefd.

Omdat geen behoefte bestond aan de mogelijkheid tot sneller afslaan zijn op de afsluiters A deze flensen \emptyset 75 mm aangebracht.

Voor afsluiter A met gat \emptyset 75 mm geldt dat de waterstand h_a in de hevel in minder dan 1 minuut en 30 seconden beneden de kruin gezakt is (afhankelijk van het verval) en er dus geen afvoer meer is.

Na 6 à 7 minuten is de hevel totaal afgeslagen, dat wil zeggen dat de hevelbeenwaterstanden h_a en h_b zijn gedaald tot op het niveau van het buitenwater.

5.1.3.2 Tijdsduur van afslaan en grootte van beluchtingsopening bij afsluiter B

Afsluiter B is de noodafsluiter, die eventueel traag mag worden geopend.

Na overleg met Dir. Bruggen is voor afsluiter B onderzocht het afslaan met vlinderklepopeningen van 47 en 50% (overeenkomend met gaten van \emptyset 80 respectievelijk \emptyset 90 mm in smoorflenzen). De resultaten zijn ook in tabel 14 vermeld en grafisch in figuur 44 aangegeven.

Dat deze resultaten weinig afwijken van die van afsluiter A is het gevolg van de bij B aangebrachte smoorinrichting, waardoor afsluiter B vertraagd in 1 minuut wordt opengestuurd. Dit vertraagd opensturen nivelleert kennelijk de uitwerking van de grotere opening.

Figuur 47 geeft de p_{12} en de Q_L als functie van de tijd bij een $\Delta H \approx 0$. Vergelijking met figuur 45 toont duidelijk de invloed aan van het vertraagd opengaan van afsluiter B op zowel de Q_L als de p_{12} .

Er is een noodsituatie denkbaar waarbij "tegelijk" afsluiter A en B worden geopend. Dat wil zeggen 1 minuut nadat A geopend is gaat B vertraagd open.

Deze combinatie C is één keer tijdens de metingen gesimuleerd (combinatie C) en bleek volkomen veilig.

In figuur 48 zijn gegeven de p_{12} en de Q_L . Wat de Q_L betreft:

- 1) de gemeten Q_L via afsluiter B
- 2) de geschatte Q_L via afsluiter A, waarbij is verondersteld dat de Q_L aanvankelijk overeenkomt met de Q_L bij afslaan via A bij $\Delta H \approx 0$ (de situatie van fig. 45).

Er kon namelijk slechts voor één afsluiter de Q_L gemeten worden.

Analyse en konklusie

Voor afsluiter B met gat \emptyset 80 mm gelden globaal dezelfde tijden als voor afsluiter A: het effect van de grotere diameter wordt tegengewerkt door de vertraagde openingsbeweging. Dus in 1,5 min is h_a beneden de kruin gezakt, in 7 min is de hevel volledig afgeslagen (bij $\Delta H \approx 0$).

De combinatie C (afsluiter A en B) is bij $\Delta H \approx 0,0$ m ongevaarlijk, zodat bij $\Delta H > 0$ zeker geen problemen worden gevreesd. Immers bij $\Delta H > 0$ wordt door het stromende water lucht meegevoerd.

5.1.3.3 Maximum verval waarbij kan worden afgeslagen

Naar dit maximum verval is niet expliciet gezocht. Het grootste verval waarbij tijdens de prototypemetingen is afgeslagen door middel van afsluiter A (gat \emptyset 75 mm) bedroeg: $\Delta H = 1,50$ m.

Omdat dit binnen de 10 minuten gerealiseerd werd bestaat de indruk dat bij vervallen groter dan $\Delta H = 1,50$ m nog steeds met afsluiter A kan worden afgeslagen.

Met afsluiter A en B samen zal naar verwachting bij elk mogelijk verval kunnen worden afgeslagen, zonder dat van extreme dynamische verschijnselen sprake zal zijn.

5.2 Resultaten van belang voor verifikatie modelonderzoek

5.2.0 Algemeen

Zoals reeds eerder is opgemerkt was het modelonderzoek vooral gericht op: afvoer Capaciteiten, luchttransport en aan- en afslagprocedures.

Om zeer uiteenlopende redenen is een vergelijking van model- en protoresultaten van vooral de eerste twee facetten nauwelijks mogelijk gebleken.

Eén van de belangrijkste redenen was wel dat de geometrie van het gebouwde kunstwerk sterk afweek van die, welke in model is onderzocht (zie ook 4.1).

Vooraf de afwijkingen aan de instroomzijde hadden vergaande consequenties ten aanzien van "luchtaspekten" en verliescoëfficiënten (fig. 4.1).

Op de problemen met de debietmeting (de a.d.m. werkte niet bij veel ingesloten lucht) is in 2.4 en 4.1 gewezen.

Na een aantal proeven bleef de h_a (bij afslaan bijvoorbeeld) volgens de bewuste kelkbaak bij $\pm 2,50 \text{ m} + \text{NAP}$ "steken". Deze h_a verliep vanaf deze waarde zeer traag naar het Grevelingenpeil. (Dit kon wel uren duren.) Bij de demontage van de kelkbakens werd op deze positie ($\pm 2,50 \text{ m} + \text{NAP}$) een prop zeegras aangetroffen, die omdat deze nat bleef wellicht de oorzaak was van de onbetrouwbaarheid voor waarden van $h_a < 2,50 \text{ m} + \text{NAP}$. Overigens kan dit verschijnsel zich ook al dan niet tijdelijk voorgedaan hebben bij hogere waarden voor h_a en h_b .

Opmerkelijk is bijvoorbeeld dat het nogal eens voorkwam dat in een aantal situaties bij $h_a > 4,00 \text{ m} + \text{NAP}$ de h_b hoger bleek dan h_a . Een oorzaak hiervan kan ook het turbulente gebeuren ter plaatse van de h_b zijn. Opspattend schuim heeft wellicht een kortsluiting veroorzaakt op een hoogte $>$ de eigenlijke h_b . Per stromingssituatie worden hierna de modelresultaten, voor zover mogelijk, met de prototypesresultaten vergeleken.

In geval van stationaire stroming is vergelijking met modelresultaten niet zinvol door het optreden van schaalearkten. Deze schaalearkten zijn eigenlijk het belangrijkste onderwerp, voor zover het de luctaspekten betreft. Daarom wordt de stationaire situatie vergeleken met uitkomsten van op modelonderzoek gebaseerde extrapolatietechnieken.

5.2.1 Volledig aangeslagen

5.2.1.1 Afvoerkapaciteit

In figuur 49 is een vergelijking mogelijk van de $Q-\Delta H$ relatie in model en prototype. Gegeven is voor de prototypesituatie de lijn voor het debiet in koker 2 bij 3 stromende kokers.

Het debiet in prototype is zeker 15% lager dan in model is gevonden. Als belangrijkste oorzaken worden beschouwd:

- a) de geometrische afwijkingen (andere ξ_{tot})
- b) de luchtinsluiting bovenstrooms (extra kontraktie).

In figuur 49 is ook aangegeven een $Q-\Delta H$ relatie voor de situatie waarbij 10% meer wordt afgevoerd. In paragraaf 5.1.1.1 is immers aangegeven dat de luchtinsluiting een debietreduktie van 5 à 10% geven kan.

5.2.1.2 Energieverliezen

Voor vergelijking van deze waarden wordt verwezen naar tabel 5.1 in paragraaf 5.1.1.2.

Om dezelfde redenen als hierboven genoemd is de afwijking van de ξ nog al groot.

Wel moet worden bedacht dat een ξ -waarde van 2 slechts een grove benadering is. Zo is voor 3 werkende kokers (voor $\Delta H > 0,8$): $\xi = 1,8$ (zie fig. 29).

5.2.2 Aanslaan

5.2.2.1 Aanslaan met de vakuumpomp

Een vergelijking van gemeten aanslagtijden met waarden uit het modelonderzoek is niet zo zinvol omdat 1) de luchtpompkapaciteit in model niet overeenkwam met die in prototype. Bovendien is de "vertaling" van een waarde uit model naar prototype onduidelijk.

5.2.2.2 Zelf aanslaan

In de sterk gewijzigde opzet van de prototypeproeven zijn maar weinig expliciete proeven met zelf aanslaan uitgevoerd.

Te weinig om de voorgestelde relaties Q_L met (Q , h_a resp. p_{12}) te realiseren.

5.2.3 Afslaan

Een vergelijking van modelresultaten met die van de prototypeproeven is zonder een tijdrovende bewerking niet mogelijk, trouwens ook niet zo zinvol, omdat tijdens de protoproeven voornamelijk is afgeslagen bij $\Delta H \approx 0$ met afsluiteropeningen waarvoor geldt dat ξ van de luchtleiding ≈ 32 (in model veel groter).

Op de eerste dagen van de proefperiode (de dagen waarin vooral naar de optimale opening werd gezocht) zijn bovendien de debietmeting en de meting van h_a nogal gebrekkig geweest.

5.2.4 Stationaire stroming

Zoals in bijlage 3 is aangegeven vindt de vergelijking van model- met prototypewaarden plaats aan de hand van de Q_L -(h_a resp. Q_w) relatie voor diverse waarden van ΔH . De vergelijking wordt hier eerst gemaakt met de resultaten van de extrapolatie van modelgegevens volgens Casteleyn 2.

Daarvoor is eerst een vergelijking noodzakelijk van de relatie Q_w - h_a (bij diverse ΔH) voor model en prototype omdat dit de enige mogelijkheid is om te beoordelen of de stromingscondities in de knie in model en proto enigszins overeenkomen.

Die overeenkomst is goed zoals uit figuur 50 moge blijken.

Wel is van belang dat bij grotere debieten lucht wordt meegevoerd waardoor de a.d.m.-aflezing te hoog kan zijn. Hierdoor wordt bij een bepaalde h_a en ΔH in proto minder water afgevoerd dan hier is aangegeven.

Vergelijking van de Q_L - h_a relaties (in fig. 51) leert een aantal opmerkelijke feiten:

- 1) Het maximum gemeten luchtdebiet in prototype treedt op bij ongeveer dezelfde h_a ($\pm 5,50$ m + NAP) voor $\Delta H > 1,00$ m.
- 2) Bij dezelfde ΔH is het gemeten maximum luchtdebiet als regel kleiner dan het door Casteleyn voorspelde.
- 3) De gemeten krommen voor Q_L - h_a zijn daarentegen minder "spits" dan de voorspelde. Anders gezegd: de krommes voor proto- en voorspelde waarden snijden elkaar, waardoor voor kleinere h_a (en dezelfde ΔH) meer lucht in proto wordt afgevoerd dan door Casteleyn was voorspeld.

Voor $\Delta H < 0,8$ is de situatie voor de gemeten waarden nogal onduidelijk.

Voor waarden van $h_a < 5,00$ m liggen de krommes voor de diverse ΔH zeer dicht opeen. De reden hiervoor is nog onduidelijk. Wellicht heeft de wind hier een rol gespeeld.

Voor alle krommes geldt dat de metingen ervan beïnvloed zijn door de van bovenstrooms aangevoerde lucht. De luchttransportcapaciteit is in elk geval groter dan de gemeten!

5.3 Resultaten van belang voor toekomstig ontwerp.

5.3.0 Algemeen

Als er gezocht wordt naar ontwerpregels om een toekomstig ontwerp te vergemakkelijken, dan zijn dit regels waarin aanslaan en afslaan, en dus luchttransport een belangrijke rol spelen.

In deze volgende paragrafen wordt dan ook uitsluitend hieraan aandacht besteed.

5.3.1 Aanslaan met vakuumpomp

Beschrijving aanslagproces

Voor een aantal situaties is "aanslaan" gesimuleerd met behulp van het rekenprogramma (volgens bijlage B.4.2).

In figuur 33, 34 en 35 is behalve het gemeten verloop van p_{12} , h_a en h_b ook het berekende verloop van p_{12} en h_a gegeven.

In de berekening is ingevoerd de gemiddelde effectieve capaciteit:

$$K_e = 0,28 \text{ voor 1 pomp op 1 hevel}$$

$$K_e = 0,32 \text{ voor 2 pompen op 3 hevels (= 0,213 per hevel)}$$

$$K_e = 0,35 \text{ voor 3 pompen op 6 hevels (= 0,175 per hevel).}$$

Met afvoer van de lucht, door het stromende water is geen rekening gehouden. (Vooral ook omdat het verval klein is.)

In alle drie gevallen beschrijft het rekenmodelletje de situatie goed tot op het moment waarop $h_a = 3,00 \text{ m} + \text{NAP}$, daarna volgen afwijkingen, in die zin dat het berekende aanslaan te snel geschiedt (fout ongeveer -10%) en de absolute druk te laag wordt. De oorzaak moet gezocht worden in

a) de sterk schematische berekening van de grootte van het wateroppervlak en de inhoud van de "luchtkamer".

Het verloop van de waterspiegel is op basis van modelonderzoekgegevens (hoofdzakelijk bij $\Delta H = 1,60 \text{ m}$) geschat

b) de aanname dat de faktor C in

$$p_{12}^* = N - (3 - h_1) - C(y - 3) \quad (\text{B.14})$$

(zie bijlage B4.2)

is $C = 1,2$.

Het is zeer waarschijnlijk dat C kleiner is, bij kleine ΔH , omdat de stroming dan gering is (Q is klein) en de situatie minder afwijkt van die bij stilstaand water waarvoor geldt:

$$p_{12}^* = N - (3 - h_1) - (y - 3) \quad (41)$$

$$= (N - h_1) - y \quad (42)$$

Een berekening van aanslaan met $C = 1$ leverde overigens dezelfde aanslagtijden op. Wel is de situatie ten aanzien van de drukken verbeterd zoals in figuur 33, 34 en 35 is aangegeven.

Dat de aanslagtijden tijdens ongewijzigd blijven, ondanks de vergroting van de term $N - y$ ($= p_{12}^*$) uit formule (13) van bijlage B.4.2.

$$K \Delta t = \left(A + \frac{V}{N - y} \right) \Delta y$$

is een gevolg van de compensatie door de toename van $\Delta y / \Delta t$

c) het konstant blijven van K voor alle waarden van p. Uit figuur 40 blijkt dat dit niet geheel korrekt is.

K neemt af bij afnemende druk.

De belangrijkste oorzaak van de afwijkingen is ongetwijfeld de onnauwkeurige beschrijving van het luchtkamervolume en de grootte van het wateroppervlak.

Konklusie

Het aanslaan is met het rekenmodelletje van bijlage B.4.2 goed te beschrijven, mits de effectieve luchtpompkapaciteit en het verloop van de grootte het wateroppervlak en het verloop van het volume van de luchtkamer als functie van de h_a bekend zijn.

Aanslagtijd

Alleen voor de bepaling van de aanslagtijd is reeds in verslag M1347/M1348 [3] een formule afgeleid (zie ook bijlage B.4.1).

$$KT = V_o \left\{ 2 + \left(1 - \frac{N}{y_o} \right) \ln \left(\frac{N}{N - y_o} \right) \right\} \quad (B.9)$$

Deze formule is afgeleid voor "stilstaand water" dus $\Delta H = 0$. In de situatie dat $\Delta H \neq 0$ is als eerste benadering voor y_o de waarde van de (onder)druk P_{12}^* zinvol.

Voor enkele situaties zijn in tabel 5.2 de aanslagtijden berekend en vergeleken met de waarden uit het proto-onderzoek (volgens fig. 32).

Tabel 5.2

proef nr.	ΔH (m)	V_o (m ³)	N (mwk)	y_o (P ₁₂ [*]) (m (mwk))	K (m ³ /s)	T _{ber} (min)	T _{proto} (min)
1	0	176 ^{+))}	10,0	6,4	0,28 ^{+))}	15,0	16,0
2	0,4	1092 ^{o))}	10,1	6,7	0,35 ^{o))}	25,1	25,0
3	1,2	1934 ^{+))}	9,94	7,0	0,28 ^{+))}	17,1	17,0
4	1,5	1188 ^{o))}	10,0	7,4	0,35 ^{o))}	28,8	25,0

Opmerking: +) 1 pomp op 1 hevel

o) 3 pompen op 6 hevels

Uit deze berekeningen blijkt dat formule (B.9) een goede beschrijving geeft van het aanslaan voor het geval dat ΔH klein is. Is $\Delta H \neq 0$ dan is P_{12}^* een redelijke benadering voor de y_0 . Wordt ΔH groter dan wordt ook door het stromende water lucht afgevoerd. De benadering wordt zodoende steeds minder nauwkeurig.

5.3.2 Zelf aanslaan

Een aantal van de "zelf aanslaanproeven", zoals weergegeven in figuur 39, zijn met het rekenmodelletje van bijlage B.4.3 nagerekend. Voor de bepaling van de luchttransportkapaciteit is nu steeds één van de luchtdebietformules gebruikt (formule 5: Ervine 2).

Het debiet dient per tijdstap, afhankelijk van de h_a en ΔH , bekend te zijn, en wordt dan ook aan modelgegevens ontleend. Zo ook de v_b , die volgens één van de methoden van bijlage 6 bepaald dient te worden. Hier met behulp van methode 2 of methode 4. Duidelijk is wel dat de betrouwbaarheid behalve van de juistheid van de luchtdebietformules sterk afhankelijk is van de mate van nauwkeurigheid waarmee het stromingsgebeuren (Q , h_a , d_b) in de kruin wordt gereproduceerd in het rekenproces.

Omdat reeds op grond van modelonderzoek bekend is dat deze stromingsontwikkeling bij een dynamisch proces (als aanslaan met de pomp en zelf aanslaan) niet identiek is aan die bij een stationaire situatie, mag ook daarom niet worden verwacht dat de berekende en gemeten tijdens sterk overeenkomen zoals ook in tabel 15 bevestigd wordt.

Daarnaast zijn in tabel 16 van de "zelf aanslaan"-proef 36 op een aantal tijdstippen, getransporteerde luchthoeveelheden berekend uit:

1) volume verandering van de luchtkamer in Δt seconden volgens:

$$q_{1z}(1) = \Delta V / \Delta t$$

2) formule 5 van paragraaf (Ervine 2)

$$q_{1z}(2) = k F_r^2 (1 - v_c/v_b)(1 - v_r/v_0) q_w$$

en wel zodanig dat $q_{1z}(2)$ het gemiddelde is van de q_{1z} op tijdstip (t) en q_{1z} op tijdstip (t- Δt)

3) formule (B.16) van de bijlage B.4.3

$$q_{1z}(3) = \left(A + \frac{Vol}{N-y} \right) * \Delta y / \Delta t$$

waarbij voor A, Vol en $N-y = P_{12}^*$ de gemiddelden zijn genomen van de waarden op tijdstip t en t- Δt .

Analyse en konklusie

Over het algemeen is de berekende aanslagtijd te kort, de voornaamste oorzaak hiervan ligt in een onjuiste berekende waarde voor het volume van de luchtkamer.

Dit is vooral bij hogere waarden van h_a het geval. Want indien zelf aanslaan aanvangt bij een hoge h_a dan is het verschil tussen de gemeten en berekende tijd relatief het grootst (tabel 15). Deze konklusie volgt ook uit tabel 16 want bij grotere waarden voor h_a is de q_{1z} onwaarschijnlijk groot.

In het rekenprogramma wordt aangenomen dat zodra $h_a = 6,20 \text{ m} + \text{NAP}$ de hevel volledig is aangeslagen. Modelonderzoek maakt evenwel zeer aannemelijk dat er benedenstrooms van de kroon nog wel degelijk een luchtbel aanwezig is. De inhoud van deze bel is evenwel sterk afhankelijk van het verval ΔH .

Zonder een zeer tijdrovende analyse is deze niet te beschrijven en daarom "noodgedwongen" in de berekeningen achterwege gelaten.

Voor een beschrijving van zelf aanslaan is een goede beschrijving van het wateroppervlak en van het volume van de luchtkamer een eerste vereiste. De hier gebruikte globale beschrijvingen zijn niet nauwkeurig genoeg.

5.3.3 Stationaire stroming

5.3.3.0 Algemeen

Voor het gebruik van de luchtdebietformules is het kennen van de v_b (de snel-

heid op het insluitpunt) een vereiste.

Allereerst wordt daarom aan de bepaling van deze v_b aandacht geschonken. Op een viertal wijzen is deze bepaald en in tabel 17, 18 en 19 weergegeven.

Omdat vijf luchtdebietformules worden gecontroleerd zijn er zodoende per proef $5 * 4 = 20$ luchtdebieten berekend en eveneens in tabel 17, 18 en 19 weergegeven. De hoop bestaat aan deze tabellen een indruk te kunnen ontleen omtrent de betrouwbaarheid van de diverse luchtdebietformules.

5.3.3.1 Bepaling van de snelheid v_b

Opvallend is al onmiddellijk de variatie in de waarden voor v_b berekend volgens de vier aangegeven methoden:

methode I : met ξ_{tot} en h_a volgens

$$v_b = v_o + \sqrt{2g\Delta H - \xi_t} v_o^2$$

(in de tabellen 17-23 genoemd: Ksi-tot.)

methode II : met behulp van figuur 10 met modelresultaten (in tabel: interpol)

methode IIIb: met p_{12} , ΔH , h_a en Q (in de tabel: H_c P12)

methode IV : met gemeten h_a en h_b volgens

$$v_b = \sqrt{2g(h_a - h_b)}$$

(in tabel: h_a en h_b)

Dat methode II redelijk betrouwbaar is, mag worden verwacht op grond van de resultaten, weergegeven in figuur 50. Hieruit mag geconcludeerd worden, dat de stationaire stroming in model kennelijk goed is gereproduceerd.

In vele situaties heeft de bepaling van de v_b volgens methode II overigens niet gefunctioneerd omdat modelresultaten voor de betreffende ΔH en h_a niet beschikbaar waren (zie ook fig. 10).

Voor de verdere analyse zijn voornamelijk die situaties gebruikt waarin methode II wel functioneerde.

Analyse van de berekeningen van v_b

Methode I

Van belang zijn hierbij vooral de parameters: v_o en ξ_{tot} .

Uit de debietmeting wordt v_o bepaald. De invloed van de variatie in Q blijkt uit tabel 20, waarin een aantal situaties wordt vergeleken met gesimuleerde situaties, waarin het debiet 10% kleiner is. De invloed van de debietvariatie op de waarde van v_{bI} is maar gering (al is de konsekwentie voor de berekende luchtdebieten beslist niet verwaarloosbaar!).

De invloed van ξ_{tot} op v_b is vooral van belang bij grotere debieten, zoals uit tabel 21 en 20a valt af te leiden.

De eerste indruk uit tabel 20 en 21 is dat methode I redelijk betrouwbaar is mits Q en ξ_{totaal} korrekt zijn.

Methode III

Bij deze methode is een groot aantal parameters van belang die elk hun eigen onnauwkeurigheid bezitten

- a) de p_{12} en atmosferische druk (p_{atm})
- b) de h_a
- c) de Q voor de v_o bepaling
- d) de ξ_{14-3} (in de bepaling van h_c).

De meting van de druk is redelijk betrouwbaar geweest (afwijking $\pm 1,5\%$), de invloed van deze variatie is gering.

De invloed van de h_a is aanzienlijk groter zoals uit vergelijkingen van tabel 20a en 22 blijkt, waar de h_a met 0,10 m (= 2%) gevarieerd is. De waarden voor v_b varieerden evenwel met 6 tot 8%! (Voor de berekende luchtdebieten heeft dit grote konsekwenties.)

Uit vergelijkingen van tabel 20a en 20b blijkt de invloed van de Q-variantie weer betrekkelijk gering te zijn.

Uit tabel 20a en 23 dat de invloed van variatie in ξ_{14-3} ook weer gering is.

De op het eerste gezicht geringere betrouwbaarheid van methode III is dus voornamelijk te wijten aan de onnauwkeurigheid van de h_a -meting. Een fout van 0,10 m is zeker niet ondenkbaar: gezien de onnauwkeurigheid van de kelkbaak en de later noodzakelijk gebleken correcties (voor te lage aanwijzing en "schuinstaan" van de waterspiegel).

Methode IV

Dat de v_b volgens $v_b = \sqrt{2g(h_a - h_b)}$ veel te lage uitkomsten geeft is naar alle waarschijnlijkheid te wijten aan de foutieve h_b meting (h_b is te hoog!).

Konkluderend

Met zowel methode I als III is de v_b goed te bepalen mits de daarvoor benodigde parameters betrouwbaar zijn.

Door de opzet van de prototypemetingen zijn deze helaas minder betrouwbaar (vooral de Q en de h_a).

5.3.3.2 Luchttransportkapaciteit

Onderstaande analyse vindt plaats aan de hand van tabel 17, 18 en 19, en wel in het bijzonder aan de hand van die proeven waarbij de v_b bepaling volgens methode II mogelijk was. Berekende debieten die minder dan 30% afwijken van de gemeten waarden zijn gemarkeerd (afwijking $a \leq 10\%$ door: ***; $10 < a \leq 20\%$ door: **; $20 < a \leq 30\%$ door: *).

De duidelijke tendens waarop gehoopt werd, is niet licht te ontdekken.

In onderstaande overzichtje wordt aangegeven hoe vaak een bepaalde luchtdebiet-formule de situatie juist (d.w.z. met een fout, die kleiner is dan 30%) voor-spelde:

Tabel 5.4 Aantal juiste luchtdebietberekeningen

aantal hevels	aantal proeven	Cast. 1 1	Cast. 2 2	Thomas 3	Ervine 1 4	Ervine 2 5
1	10	0(0)	4(5)	(4)	3(4)	7(6)
3	19	3(4)	8(10)	(10)	1(0)	13(15)
6	11	0(0)	6(6)	(2)	1(0)	7(8)
totaal	40	3(4)	18(21)	(16)	5(4)	27(29)

In de gebruikte formules is $v_c = 0,8$ m/s. Voor het geval dat $v_c = 1$ m/s staan de aantallen tussen ().

De "Ervine 2"-formule voldoet op het eerste gezicht het best: In ongeveer 70% van de gevallen een "goede" voorspelling.

Een verdeling van het aantal "overschattingen" in de luchtdebietberekening (d.w.z. $(Q_{ber} : Q_{L,gemeten}) > 1$) volgt hieronder

Tabel 5.5 Aantal overschatte luchtdebieten

aantal hevels	aantal proeven	Cast. 1 1	Cast. 2 2	Thomas 3	Ervine 1 4	Ervine 2 5
1	10	(9)	7(5)	(7)	(0)	8(8)
3	19	(18)	11(10)	(6)	(0)	10(11)
6	11	(11)	5(5)	(1)	(0)	4(4)
totaal	40	(38)	23(20)	(14)	(0)	22(23)

Hieruit blijkt dat aan de aantallen over-(c.q. onder-)schattingen geen conclusies mogen worden verbonden. Van belang is verder de overweging dat de werkelijke luchttransportcapaciteit van stromend water in elk geval groter is dan

de gemeten luchtdebieten omdat ook de van bovenstrooms aangevoerde lucht, uit de knie wordt afgevoerd.

Tabel 5.6 geeft de gemiddelde waarden van de berekende luchtdebieten en de spreiding uitgedrukt in procenten voor zowel $v_c = 0,8$ als $v_c = 1$ m/s.

Tabel 5.6 Gemiddelde waarden en spreiding van berekende luchtdebieten in procenten van de gemeten debieten

aantal hevels	Cast. 1	Cast. 2	Thomas	Ervine 1	Ervine 2
1 \bar{q}	580 (580,4)	126 (111,5)	(116,8)	65,8(58,0)	110,8(116,9)
s	444 (443,8)	82 (73,4)	(40,7)	18,2(16,5)	47,1 (30,2)
3 \bar{q}	507,9(507,9)	114,3(100,6)	(86,1)	53,6(47,2)	103,4(99,0)
s	237 (237,7)	495 (43,8)	(48,7)	16,9(15,1)	27,0(26,0)
6 \bar{q}	446,5(446,5)	115,4(100,6)	(49,8)	43,4(37,8)	88,4(84,6)
s	177,1(177,1)	39,7(34,8)	(45,6)	14,5(13,1)	25,3(24,4)

Konklusies met betrekking tot de luchtdebiëtfomules

1. Casteleyn 1: $q_L = m v_b^{5,6}$

Ook als rekening gehouden wordt met het feit dat van bovenstrooms lucht wordt aangevoerd, dan wijzen de resultaten uit de bovengenoemde tabellen toch duidelijk uit dat bij Cast. 1 de luchttransportkapaciteit sterk wordt overschat.

De oorzaak van de overschatting ligt behalve in de "gevoeligheid" voor de v_b (tot de macht: 5,6) in de waarde voor de m (als functie van de h_a) ontleend aan modelonderzoek.

2. Casteleyn 2: $q_L = \alpha_c (v_b - v_c)^3$

In ongeveer 50% van het aantal situaties voorspelt Casteleyn het luchtdebiet "korrekt", waarbij de gemiddelde waarde van q : 100 tot 125% bedraagt en de spreiding erg groot is (40-70%) van gemeten debiet. De berekeningen met $v_c = 1$ m/s leveren een iets beter resultaat dan die met $v_c = 0,8$ m/s.

3. Thomas: $q_L = \frac{q_w}{40} (F_r - 1) (1 - v_c/v_b)^2 (1 - 1/3 v_c/v_b)^{-1}$

Behalve bij 1 hevel, onderschat Thomas meestal de luchttransportkapaciteit. Een beoordeling van deze formule blijft moeilijk om de vele aannames die zijn gedaan (zie ook bijlage 5 en verder [4]). Wel lijkt de veronderstelling dat $F_r > 1$ moet zijn niet noodzakelijk.

Voor waarden van $F_r < 1$ vindt Thomas negatieve luchtdebieten, terwijl de overige formules wel degelijk resultaten kunnen geven die redelijk beantwoorden aan de gemeten luchtdebieten.

4. Ervine 1: $q_L = 0,00045 \alpha_E (v_b - v_c)^3$

In nagenoeg alle situaties wordt het luchtdebiet door deze formule sterk onderschat. De oorzaak ligt in de faktor $0,00045 \alpha_E$, vergelijkbaar met de α_c uit Casteleyn 2.

Voor $\alpha_c = 0,00045 * 0,8 = 0,00036$, die volgens figuur 8 optreedt bij $h_a = 5,10$ m, komt de q_L volgens Ervine 1 overeen met die volgens Casteleyn 2.

Opvallend is verder dat wat de "orde van grootte" betreft, q_L volgens Ervine 1 ongeveer de helft is van q_L volgens Ervine 2.

5. Ervine 2: $q_L = K F_r^2 (1 - v_c/v_b) (1 - v_r/v_o) q_w$

Rekening houdend met alle gepleegde veronderstellingen lijkt dit de beste luchttransportformule, vooral ook omdat de spreiding bij deze formule duidelijk het geringst is.

Wel is de konklusie gewettigd dat Ervine 2 de transportkapaciteit onderschat. Bij 6 kokers in bedrijf wordt ongetwijfeld de geringste hoeveelheid lucht van bovenstrooms meegevoerd, maar nog altijd wordt lucht aangevoerd; hierbij onderschat Ervine 2 de situatie met 12%.

Samenvatting

Ofschoon de informatie uit de prototypeproeven maar zeer beperkt is, mag voorlopig worden aangenomen dat de formule 5 te weten

$$\text{Ervine 2 } q_L = K F_r^2 (1 - v_c/v_b)(1 - v_r/v_o) * q_w \quad (K \approx 6 * 10^{-3})$$

een redelijke benadering geeft van de luchttransportcapaciteit. Wel is zonder meer duidelijk dat nader onderzoek noodzakelijk is naar de diverse parameters in deze formule: de K en de v_r .

Rekening houdend met de van bovenstrooms meegevoerde lucht, kan Cast. 2 waarschijnlijk ook een redelijk resultaat geven. Wel is deze formule in geometrisch andere situaties door de onbekendheid van de α_c moeilijk hanteerbaar. Ervine 2 biedt ook dan meer mogelijkheden.

LITERATUUR

- 1 CASTELEYN, J.A., Hevels in de Grevelingendam, proeven in model 1:20
Verslag modelonderzoek M1347, juni 1976, Waterloopkundig Laboratorium
Delft
- 2 CASTELEYN, J.A., Hevels in de Grevelingendam, proeven in model 1:7
Verslag modelonderzoek M1348, aug. 1976, Waterloopkundig Laboratorium
Delft
- 3 CASTELEYN, J.A., Hevels in de Grevelingendam, extrapolatie resultaten
model 1:20 en model 1:7
Verslag modelonderzoek M1347/M1348, maart 1977, Waterloopkundig Labora-
torium Delft
- 4 THOMAS, N.H., Air demand distortion in hydraulic models (experimental
evidence of bi-model structure in air entraining flows and a scaling
analysis of detrainment with special applications to siphon priming)
International Conference on the Hydraulic Modelling of Civil Engineering
Structures, Coventry, England, Sept. 1982, Organised by BHRA (paper E5)
- 5 ERVINE, D.A., AHMED, A.A., A scaling relationship for a two dimensional
vertical dropshaft
Int. Conference on the Hydraulic Modelling of Civil Engineering Struc-
tures, Coventry England, Sept. 1982, Organised by BHRA (paper E1)
- 6 ERVINE, D.A., "Aeration in closed conduit hydraulic structures
Speurwerkverslag S330, Waterloopkundig Laboratorium Delft, juli 1980
- 7 CASTELEYN, J.A., Hevels in de Grevelingendam
Nota Voorstel prototypemetingen M1347/M1348, Waterloopkundig Laborato-
rium Delft, juni 1977
- 8 Rijkswaterstaat Deltadienst, Draaiboek en algemene omschrijving van de
prototypemeting aan de Flakkeese Spuispuis
Notitie DD.WWD-83-20.007, sept. 1983

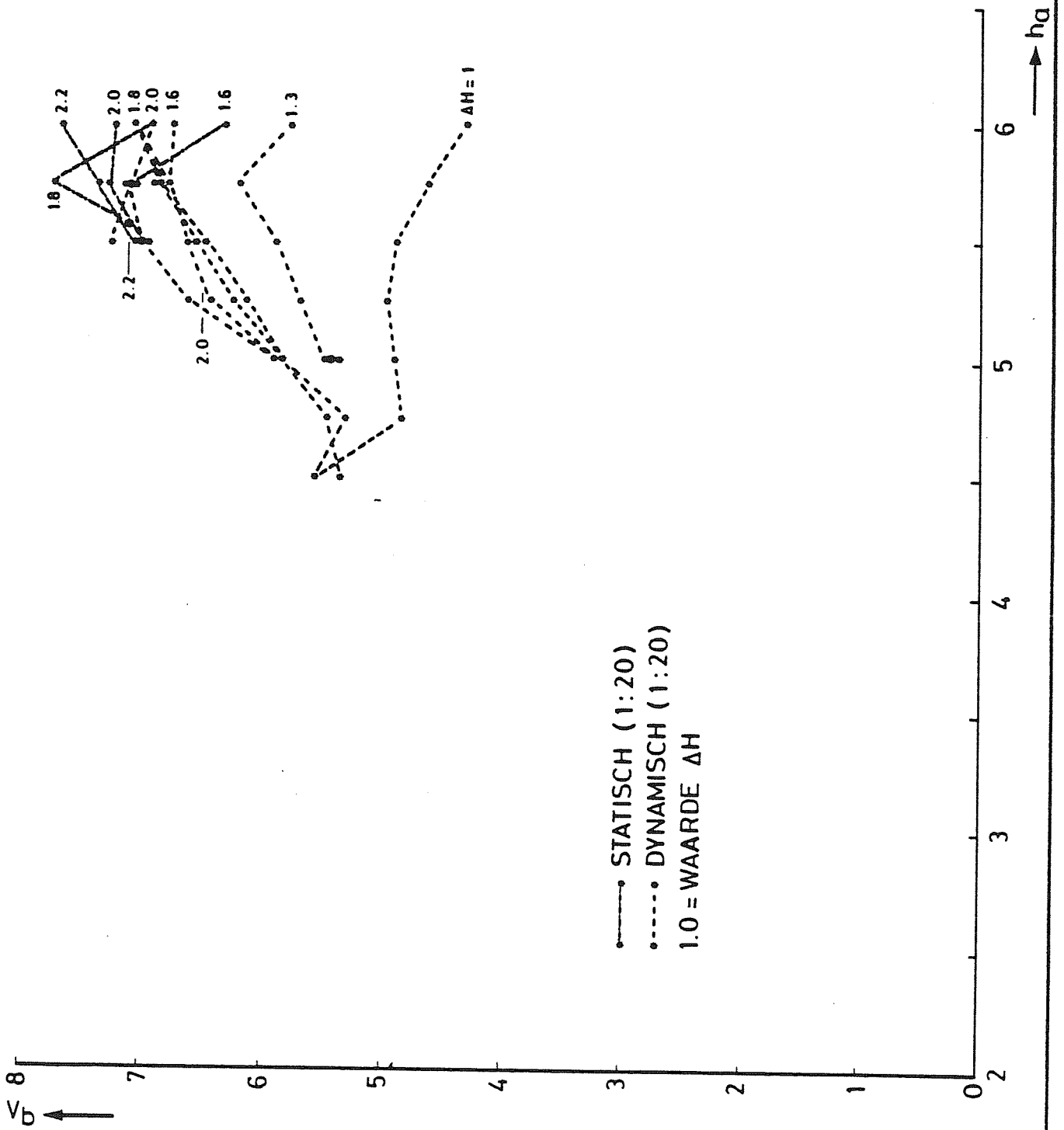
LITERATUUR (vervolg)

- 9 Int. Organisation for Standardization, Measurement of fluid flow by means of orifice plates, nozzles and venturi tubes inserted in circular cross-section conduits running full
ISO 5167 (1980-02-01)
- 10 Waterloopkundig Laboratorium, Hevels in de Grevelingendam, Testen van de gevoeligheid van geijkte inlaattuit voor dwarswind ten behoeve van prototypemetingen
Notitie onderzoek R1517-III, juli 1981
- 11 VISSER, G.Th., "Snelheidsverdelingen in de kanalen van de hevelleiding bij de Grevelingendam"
TNO, Hoofdafdeling maatschappelijke technologie, Ref.nr. 80-014235,
- Apeldoorn nov. 1980
- 12 UWLAND, J., "Flakkeese Spuisluis - prototypemetingen, voorstudie"
Notitie R1892-I, Waterloopkundig Laboratorium Delft, juli 1983
- 13 UWLAND, J., "Flakkeese Spuisluis - prototypemetingen, beheersaspecten"
Notitie R1892-II, Waterloopkundig Laboratorium Delft, november 1983
- 14 IDEL'CIK, I.E., "Memento des pertes de charge"
Eyrolles Editeur Paris, 1969

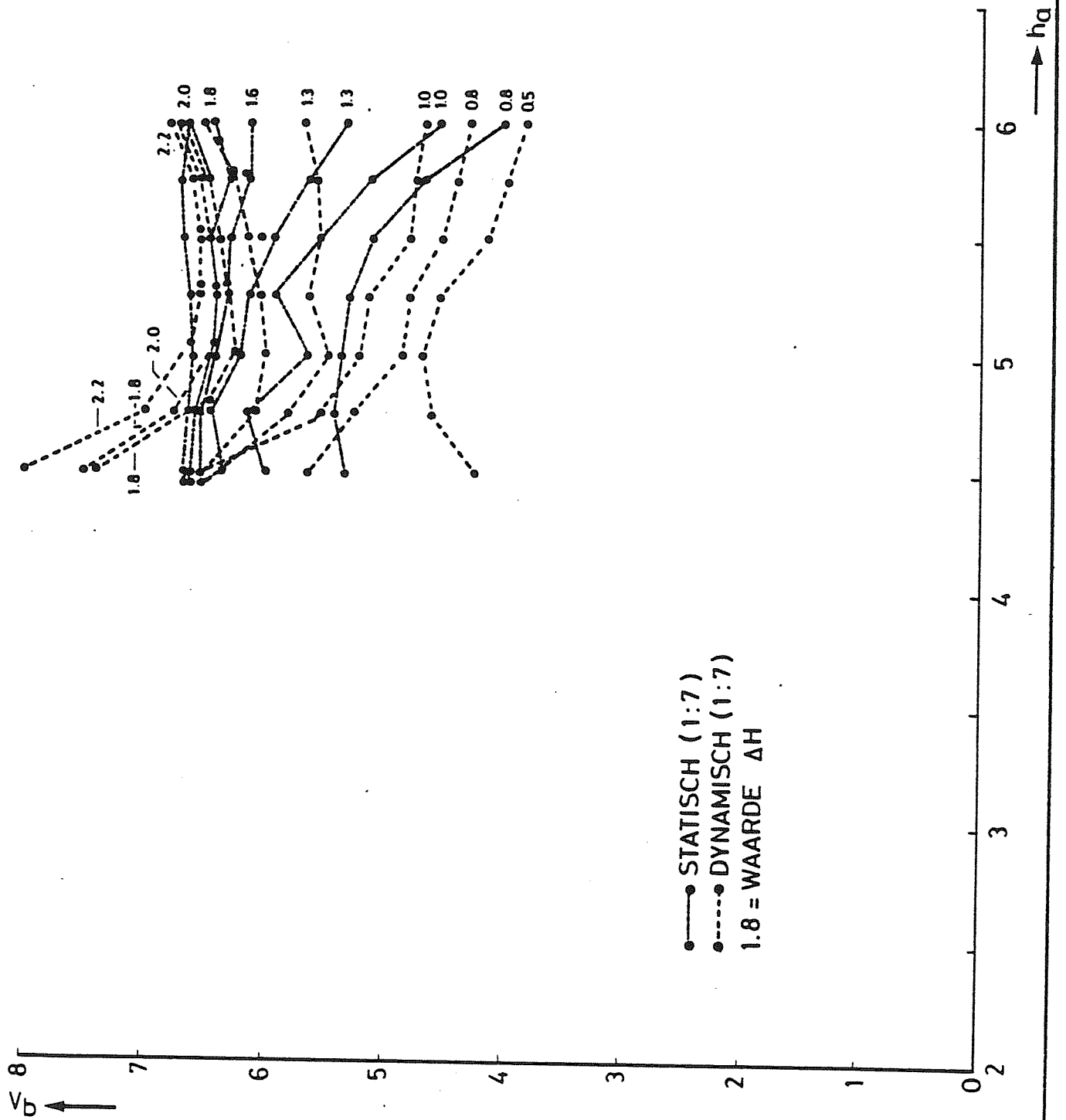
BIJLAGE 1 - Overzicht geregistreerde parameters

	a)	b)	c)	d)	e)
	aanslaan	stat. stroming	afslaan	volledig aangeslagen	zelf aanslaan
1. tijdsduur	x + ∅		x + o		x o
2. h ₁ Grevelingen	x ∅	x 0	x o	x 0	x o
3. h ₂ Grevelingen	x ∅	x 0	x o	x 0	x o
4. h ₃ Krammer	x ∅	x 0	x o	x 0	x o
5. h ₄ Krammer	x ∅	x 0	x o	x 0	x o
6. h _{5a}		x		x	
7. h _{5b}		x		x	
8. h _a	x + ∅	x 0	x + o	0	x o
9. h _b	x + ∅	x 0	x + o	0	x o
10. Q	x + ∅	x 0	x + o	x 0	x o
11. Q _L		x 0	x o		
12. A _L		x			
13. P ₁₁ (plaf.)	x + ∅	x	x +	x	x
14. P ₁₂ (kroon)	x + ∅	x 0	x + o	x 0	x o
15. P ₁₃ (kruin)	x	x	x	x	x
16. P ₁₄ (plaf.)	x + ∅	x	x +	x	x
17. P ₁₅ (bod.) ¹⁾	- - -	- -	- - -	- -	-

Verklaring: 1) al spoedig defekt
x penschrijverregistratie
+ magneetbandregistratie
H.P. bemonstering:
o om 3 seconden
∅ om 20 seconden
0 + 2 monsters per proef



V_b ALS FUNKTIE VAN ΔH EN h_a
 GEMETEN IN MODEL 1:20



V_b ALS FUNKTIE VAN ΔH EN h_a
 GEMETEN IN MODEL 1:7

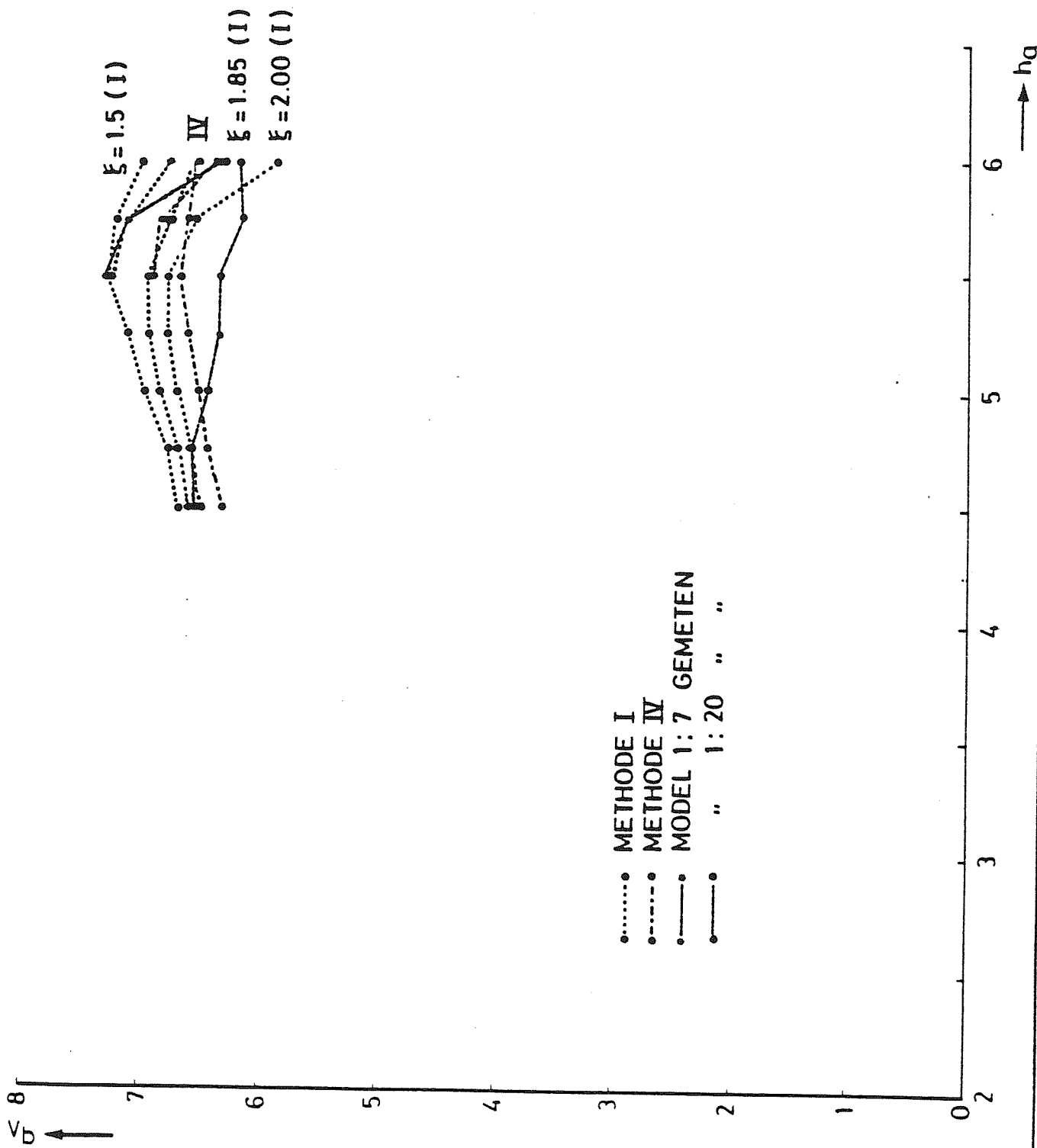
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1892

FIG. B.2

EV

A4



V_b ALS FUNKTIE VAN h_d BIJ $\Delta H = 1.60$
 (GEMETEN EN BEREKEND VOLGENS
 METHODE I EN IV)

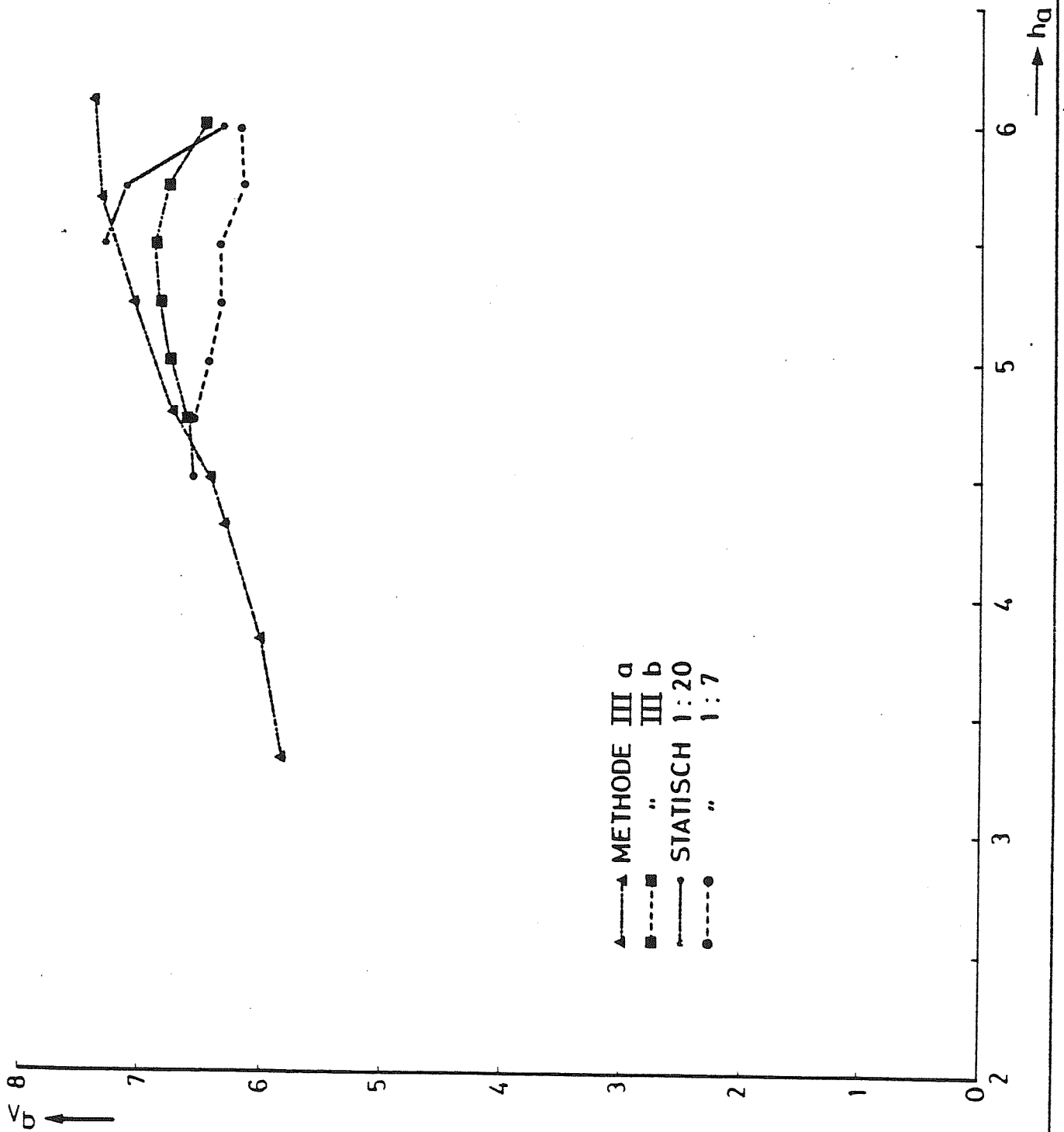
WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1892

EV

A4

FIG. B.3



V_b ALS FUNKTIE VAN h_a BIJ $\Delta H = 1.60$
 (GEMETEN EN BEREKEND VOLGENS
 METHODE III)

EV

A4

WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM

R 1892

FIG. B.4

BIJLAGE 2 - Overzicht van in modelonderzoek onderzochte relaties

- (a) aanslaan m.b.v. vakuumpomp
- (b) zelf aanslaan
- (c) volledig aangeslagen
- (d) gedeeltelijk aangeslagen
- (e) stationaire stroming d.m.v. luchttoevoer
- (f) afslaan

$P_{\text{kroon}} - h_a$	X	X		X	X	
$P_{\text{kroon}} - t$	X	X				X
$P_{\text{kroon}} - t/t_{\text{eind}}$	X					
$h_a - t$	X	X				X
$h_a - t/t_{\text{eind}}$	X					
$Q_{\text{l-afv}} - h_a$		X		X		$\Delta H = 1,60 \text{ m}$
$Q_{\text{l-afv}} - Q_w$		X		X		
$Q_{\text{l-afv}} - P_{\text{kroon}}$		X		X		
$Q_w - h_a$				X		
$Q_{\text{l-toe}} - t$					X	

$Q_w - h_a$				X		
$h_a - t/t_{\text{eind}}$	X					$\Delta H = \text{var.}$
$h_a - t$		X				
$Q_{\text{l-afv}} - Q_w$		X		X		

$Q_w - \Delta H$			X			
$Q_{\text{l-afv-max}} - \Delta H$		X		X		
$Q_{\text{l-toe-max}} - \Delta H$					X	
$P_{\text{kroon-max}} - \Delta H$			X			

BIJLAGE 3 - Overzicht op te stellen relaties

	aan- slaan	zelf aanslaan	volledig aangeslagen	statio- nair	af- slaan	opmerking
3.1 Beheer						
Afvoerkapaciteit						
$Q-\Delta H_{1-3}$			$x^1)$			1) voor 1,2,3,6
$P_{12} \Delta H_{1-3}$			$x^2)$			kokers
$Q-\Delta H_{2-4}$			$x^1)$			2) nodig voor
$\Delta H_{1-3} - \Delta H_{*2-4}$			$x^1)$			aanslaan cri-
$\Delta H_{1-2} - Q)$			$x^1)$			terium
$\Delta H_{3-4} - Q^*)$			$x^1)$			
$(P_{12} + h_a - H_1 - p(atm)) - Q$			$x^1)$			
<u>Aanslaan:</u>						
$h(h_a)_b - t$		$x^3)$	$x^3)$			3) voor div. ΔH
$T-\Delta H$		x	$x^4)$			4) voor div. h_a
$P_{12} - h_a$		$x^3)$	$x^3)$			
<u>Afslaan:</u>						
$Q_L - t$					$x^5)$	5) voor div. A_L
$h(h_a)_b - t$					$x^5)$	en ΔH
$P_{12} - h_a$					x	
$T-\Delta H$					x	
<u>Verlieskoëff.:</u>						
$P_{11} t / m P_{15} - \Delta H_{13}$				x		**)

*) zinloos gebleken

***) is vervangen door $\xi - \Delta H$

	zelfaanslaan	stationair	opmerking
3.2 Modelverifikatie			
luchttransportkap.			
$Q_L - Q_w$	$x^1)$	$x^1)$	1) voor div. ΔH
$Q_L - h_a$	$x^1)$	$x^1)$	
$Q_L - P_{12}$	$x^1)$	$x^1)$	
$\{(H_1 - H_2) - (h_a - h_b)\} - Q$		$x^1)$	
aanslaan			
als bij 3.1			
afslaan			
als bij 3.1			
3.3 Ontwerp			
luchttransport			
$Q - h_a$		$x^2)$	2) bij div. ΔH
$P_{12} - h_a$		$x^2)$	
$Vol_{lucht} - h_a$		$x^3)$	3) ontlenen aan
Opp.water- h_a		$x^3)$	modelonderz.
$K - p_{12}$		$x^4)$	4) fabrieksgeg.
$db - h_a$		$x^3)$	
$\alpha_{c a} - h$		$x^3)$	
$m' - h_a$		$x^3)$	
$\alpha_{E r} - (F \text{ en } v_o)$		$x^5)$	5) uit [4]

BIJLAGE 4 - Wiskundige beschrijving luchttransport

B4.1 Mathematische beschrijving aanslaan met vakuumpomp

Op een willekeurig tijdstip t geldt tijdens het aanslaan dat:

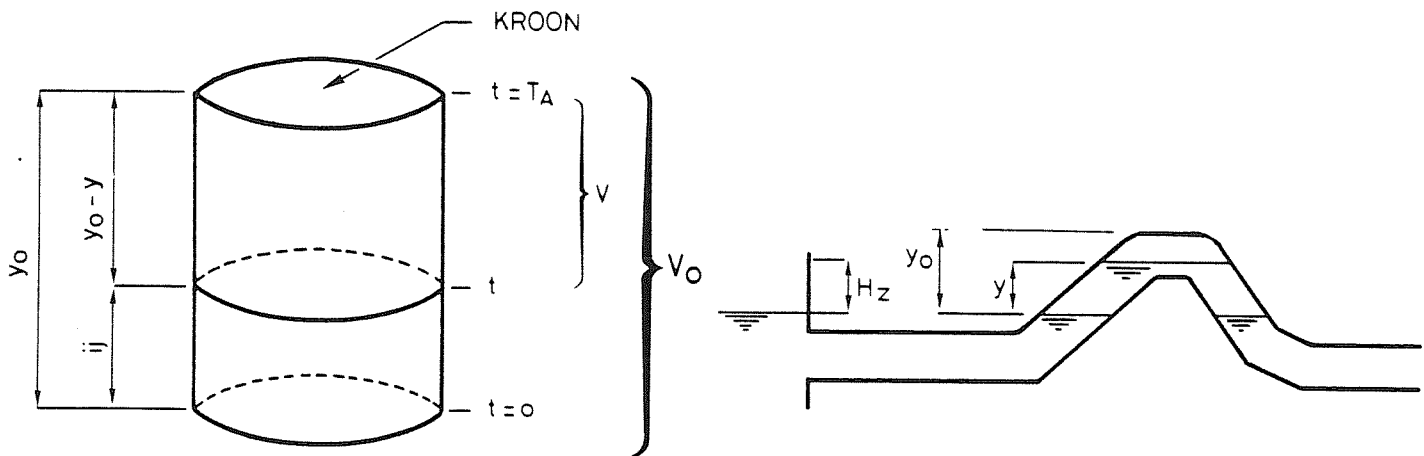
$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho_L dV = - \rho_L K \quad (1)$$

of omdat alle variabelen alleen van t afhangen:

$$V \frac{d\rho_L}{dt} + \rho_L \frac{dV}{dt} = - \rho_L K \quad (2)$$

- V = volume lucht op tijdstip t
- ρ_L = dichtheid lucht op tijdstip t
- K = capaciteit luchtpomp (m^3/s).

Wordt de hevelknie opgevat als een cilindrische bak (fig. B4.1)



Figuur B4.1

dan geldt voor $t_0 < t < T_A$

$$V = V_0 \left(1 - \frac{y}{y_0}\right) \quad (3)$$

$$\text{dus} \quad \frac{dV}{dt} = V_0/y_0 \cdot dy/dt \quad (4)$$

(3) en (4) in (2) leveren:

$$V_0 \left(1 - \frac{y}{y_0}\right) \frac{d\rho_L}{dt} + \rho_L \left(-\frac{V_0}{y_0} \frac{dy}{dt}\right) + \rho_L K = 0 \quad (5)$$

Nu bepaalt de afstand waarover de waterspiegel is opgetrokken tevens de luchtdruk en de luchtdichtheid; de laatste volgens:

$$\rho_L = \rho_{L_0} \left(1 - \frac{y}{N}\right) \quad (6)$$

ρ_{L_0} is luchtdichtheid op $t = 0$ (atmosferisch)

N_0 is atmosferische druk in mmk.

Wordt (6) in (5) ingevuld dan volgt na enige bewerking

$$-\frac{V_0}{y_0} \left(\frac{y_0 - y}{N - y} + 1\right) \frac{dy}{dt} + K = 0 \quad (7)$$

Op tijdstip $t = T$ is de waterspiegel H_z meter opgetrokken zodat:

$$\begin{aligned} \int_0^T K dt &= \int_0^{H_z} \frac{V_0}{y_0} \left(\frac{y_0 - y}{N - y} + \frac{N - y}{N - y}\right) dy = \int_0^{H_z} \frac{V_0}{y_0} \left(\frac{y_0 - 2y + N}{N - y}\right) dy \\ &= \int_0^{H_z} \frac{V_0}{y_0} \left(\frac{y_0 - N}{N - y} + 2\right) dy \end{aligned}$$

$$\text{of } KT = V_0 \left\{ \frac{2H_z}{y_0} + \left(1 - \frac{N}{y_0}\right) \ln\left(\frac{N}{N - H_z}\right) \right\} \quad (8)$$

Het luchtvolume is nul (bij gelijke waterstand in boven- en benedenbeen) als $H_z = y_0$ dan gaat (8) over in:

$$K = \frac{V_0}{T} \left\{ 2 + \left(1 - \frac{N}{y_0} \right) \ln \left(\frac{N}{N - y_0} \right) \right\} \quad (9)$$

Van belang hierbij zijn de beperkingen:

- 1) luchtkamer is een cilindrische bak
- 2) $c < \frac{N - H_z}{N}$ (kompressiecoëfficiënt)
- 3) $0 < H_z < y_0$

B4.2 Aanslaan met vakuumpomp (kwasi-stationair rekenmodel)

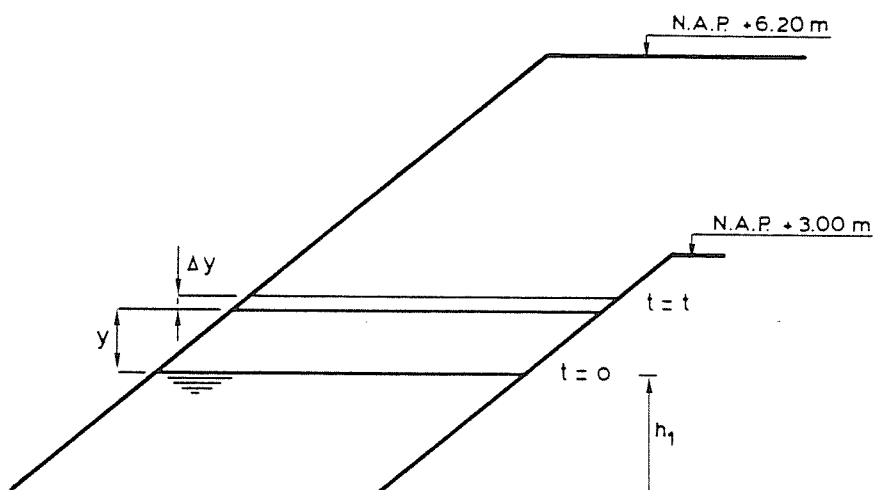
Per tijdstap Δt wordt beschreven:

- a) Het volume en de massa van de lucht die de pomp verwijdert.
- b) De verandering van de luchtkamerinhoud.
- c) De stijging van de waterspiegels in de hevelbenen.

Hiermee is mogelijk de positie van de waterspiegels als functie van de tijd en de totale tijdsduur van aanslaan te bepalen. Het gebeuren wordt dus kwasi-stationair beschreven.

De volgende symbolen zijn gebruikt (zie ook fig. B4.2):

- $V(y)$ volume luchtkamer bij positie waterspiegel bovenbeen op y
 V_0 volume luchtkamer op tijdstip $t = 0$
 ΔV volumeverandering in Δt
 y afstand waterspiegel bovenbeen op tijdstip t tot op waterspiegel op tijdstip $t = 0$
 Δy stijging waterspiegel in Δt
 $A(y)$ wateroppervlakte bij waterspiegel op y
 N atmosferische druk (in mwk)
 $K(p)$ capaciteit van de pomp (in m^3/s) als functie van druk p
 p luchtdruk (in mwk)
 ρ_{L_0} dichtheid lucht op $t = 0$
 ρ_L dichtheid op tijdstip t



Figuur B4.2

Voor een willekeurige positie van de waterspiegel (y) geldt dat:

de waterspiegel in Δt seconden Δy stijgt

de druk in Δt seconden varieert van $N-y$ naar $N-y-\Delta y$

het volume in Δt seconden varieert van V naar $V-A*\Delta y$

de dichtheid in Δt seconden varieert van $\frac{N-y}{N} \rho_{L_0}$ naar $\frac{N-y-\Delta y}{N} \rho_{L_0}$

de pomp in Δt seconden $K*\rho_L*\Delta t$ kg lucht verzet.

Nu geldt dat

$$K*\rho_L*\Delta t = V(t)\rho_L(t) - V(t+\Delta t)\rho_L(t+\Delta t) \quad (10)$$

of wel:

$$K*\frac{N-y}{N}\rho_{L_0}*\Delta t = V\rho_{L_0}\frac{N-y}{N} - (V-A\Delta y)\rho_{L_0}\frac{N-y-\Delta y}{N} \quad (11)$$

of

$$K\Delta t = A\Delta y + \frac{(V-A\Delta y)\Delta y}{N-y}$$

dus

$$K\Delta t = A\Delta y + \frac{V\Delta y}{N-y} - \frac{A\Delta y^2}{N-y} \quad (12)$$

De laatste term van (12) is zeer klein en wordt verwaarloosd; waardoor

$$K\Delta t = \left(A + \frac{V}{N-y}\right)\Delta y \quad (13)$$

Voor V geldt in wezen $V = V_0 - \int_0^y A(y)dy$.

Bij de hevels in de Grevelingendam is $A = A(y) \neq$ konstant!

Verder is van belang de overweging dat de knie geen cilindervormige bak is, terwijl er bij $h_a > 3,00 \text{ m} + \text{NAP}$ en $\Delta H \neq 0$ een stroming ontstaat waardoor de waterspiegels beïnvloed worden.

Voor waarden van y waarbij $h_a \geq 3,00 \text{ m} + \text{NAP}$ dient daarom voor N-y te worden ingevuld: P_{12}^* , waarvoor geldt dat:

$$P_{12}^* = N - (3,00 - h_1) - 1,2(y-3) \quad (14)$$

(De faktor 1,2 is ontleend aan modelonderzoek.)

Er moeten verder nogal wat relaties worden ingevoerd te weten:

- 1) V als functie van y (of h_a) bij bepaalde ΔH (fig. 5)
- 2) A als functie van y (of h_a) bij bepaalde ΔH (fig. 53).

N.B. voor A is als benadering genomen de projectie van A op een horizontaal vlak

- 3) K als functie van p (fig. 40)
- 4) Q als functie van h_a bij bepaalde ΔH (fig. 54)
- 5) d_b als functie van h_a bij bepaalde ΔH (fig. 10).

Voor al deze relaties zijn met behulp van standaard rekenprogramma's zoveel mogelijk analytische uitdrukkingen bepaald uitgaande van modelgegevens.

Vanaf een bepaalde waterstand (in modelonderzoek ($h_a \geq 4,50$ m) wordt ook door de stroming zelf lucht afgevoerd.

Reeds is meerdere keren opgemerkt dat deze hoeveelheid lucht gering is ten opzichte van de pompdebieten, omdat de dekneer zich niet kan ontwikkelen.

Niettemin lijkt het nuttig ook deze (zelf)afvoer van lucht te verdiskonteren. Hiervoor zijn in eerste instantie de formules van paragraaf 3.3.1 te gebruiken. Wellicht is een korrektiecoëfficiënt mogelijk die het dynamische karakter beschrijft. Formule (13) wordt in dat geval aangepast tot

$$(K + q_L^*) \Delta t = \left(A + \frac{V_0 - \sum A \Delta y}{N-y} \right) \Delta y \quad (15)$$

waarbij $q_L^* = C q_L$

q_L volgt uit formule 15, 16, 17, 18 of 19 van 3.3.1.

De relaties:

4) Q als functie van h_a bij bepaalde ΔH

5) d_b als functie van h_a bij bepaalde ΔH

moeten dan wel bekend zijn uit modelonderzoek.

B4.3 Zelf aanslaan (rekenmodel)

Het is zeer zinvol de luchtformules van paragraaf 3.3.1 voor de stationaire situatie te vergelijken met het resultaat van het meer dynamische gebeuren bij zelf aanslaan. Formule (13) luidt in dat geval:

$$q_{L_z} \Delta t = \left(A + \frac{V_0 - \sum A \Delta y}{N-y} \right) \Delta y \quad (16)$$

q_{L_z} is de per tijdstap (Δt) afgevoerde lucht (als functie van ΔH en h_a)

Door nu per tijdstap de stijging Δy te registreren is het mogelijk de corresponderende q_{L_z} vast te stellen (als A en $V = V_0 - \sum A \Delta y$, bekend zijn). Deze q_{L_z} kan vergeleken worden met q_L volgend uit formules van 3.3.1. Behalve de aan het eind van B4.2 vermelde relaties moeten hier ook worden ingevoerd (afhankelijk van de gebruikte formule(s)):

- 6) m' (uit $q_L = m' v_b^{5,6}$) als functie van h_a (fig. 7)
- 7) α_c (uit $q_L = \alpha_c (v_b - v_c)^3$) als functie van h_a (fig. 8)
- 8) α_E (uit $q_L = 0,00045 (v_b - v_c)^3 \alpha_E$) als functie van h_a (fig. 9).

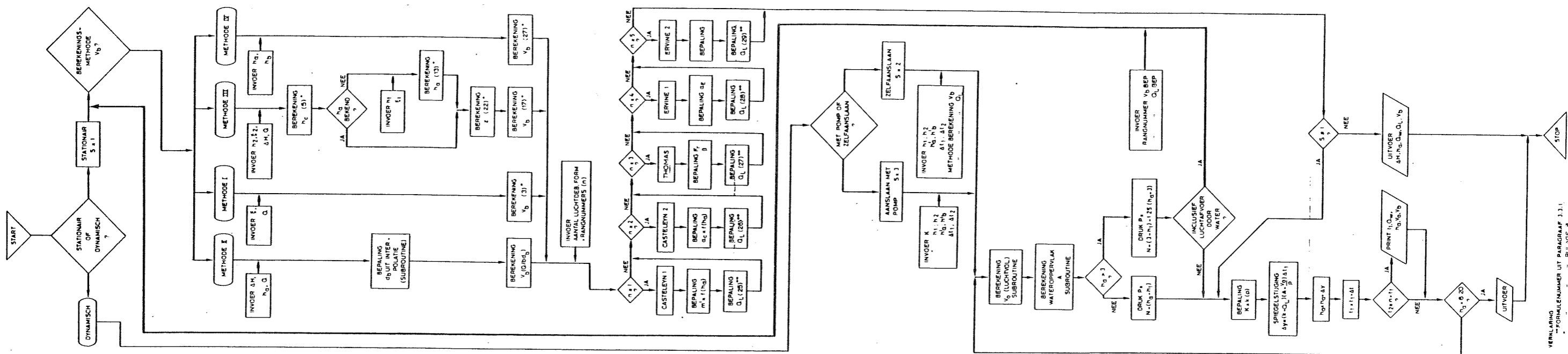
Ook voor deze relaties zijn analytische uitdrukkingen bepaald (vanzelfsprekend kunnen ook een aantal (x,y)-koördinaten van punten op deze krommes worden ingevoerd, waarbij tussen gelegen punten door middel van interpolatie kunnen worden bepaald.

In alle luchtformules is de v_b nodig. Deze waarde moet, òf worden ingevoerd (uit model- of prototype-waarnemingen), òf worden "berekend" met een van de in 3.3.1.2 vermelde methodes.

B4.4 Stationaire stroming (rekenschema)

Het rekenschema waarmee aanslaan kan worden beschreven is vervolgens zodanig uitgebreid, dat alle stroomsituaties kunnen worden doorgerekend met de formules van 3.3.1.

Ook bij stationaire situaties is zodoende een snelle analyse van de prototypegegevens mogelijk. De diverse gemeten grootheden Q_w , p_{12} , h_a , ΔH etc. kunnen worden ingevoerd (of zijn reeds in een datafile opgeslagen als de HP voor bemonstering is gebruikt), waarmee vervolgens snelle berekeningen mogelijk zijn. Bijlage B4.5 geeft het stroomschema van het complete rekenschema.



VERKLARING
 FORMULEN NUMMER UIT PARAGRAAF 3.1.1
 BIJLAGE B

STROOMSCHEMA BEREKENING LUCHTDEBIETEN EN / OF AANSLAGTIJDEN	BIJLAGE B.4.4	EV
	WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM	R1892

BIJLAGE 5 - Luchtdebietformules van Thomas en Ervine

Thomas [4]

In zijn publikatie analyseerde Thomas o.a. de modelresultaten van Casteleyn, terwijl hij zocht naar een wiskundige formulering voor zowel de totale hoeveelheid lucht die wordt ingesloten, q_{at} , als wel voor de netto hoeveelheid, die wordt afgevoerd q_{an} .

De uitdrukking van Casteleyn $q_L = \alpha_c (v_b - v_c)^3$ (waarbij $v_c = 0,8$ m/s) zou volgens Thomas voor hoge snelheden kunnen worden opgevat als

$$q_L = 0,001 (v_b - v_c)^3 \quad (1)$$

(dit is in wezen alleen korrekkt bij een $h_a \approx 5,60$ m + NAP)

of als

$$q_L = 0,01 F_r^2 \left(1 - \frac{v_c}{v_b}\right)^2 \quad (2)$$

waarbij $\Psi = 0,01 F_r^2$ is de schaalonafhankelijke luchtinsluiting

en $\beta = \left(1 - \frac{v_c}{v_b}\right)^2$ de schaalafhankelijke "ontluchting" beschrijft

$$q_L = \Psi \beta \quad \text{is dus het netto transport van lucht.}$$

Is v_0 klein, dan kan relatief veel ingesloten lucht ontsnappen aan transport, door weer naar de luchtkamers op te stijgen.

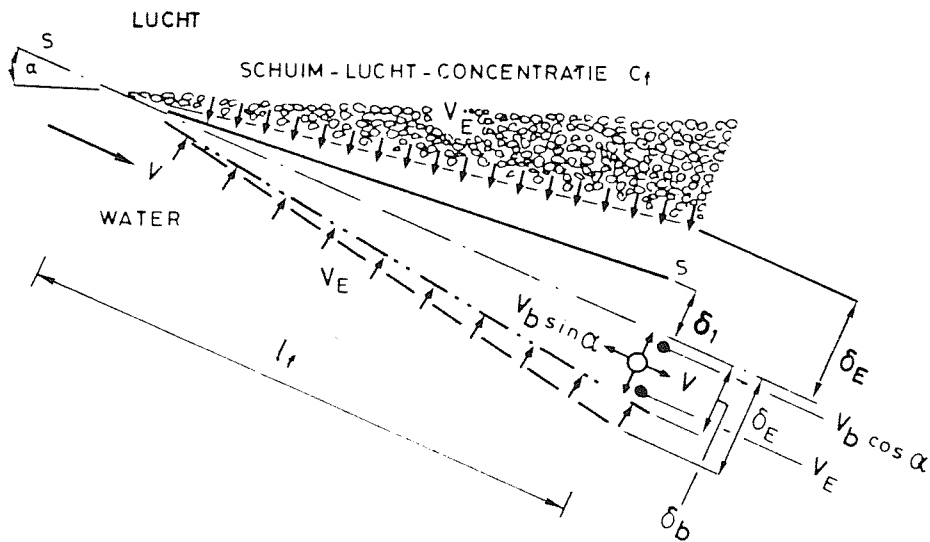
Een theoretisch afgeleide uitdrukking voor q_L resulteerde uiteindelijk in

$$q_L = \frac{q_w}{40} (F_r - 1) \left(1 - \frac{v_c}{v_b}\right)^2 \left(1 - \frac{1}{3} \frac{v_c}{v_b}\right)^{-1} \quad (3)$$

waarbij $v_c \approx 1$ m/s

Hiervoor waren nogal wat aannames nodig, namelijk

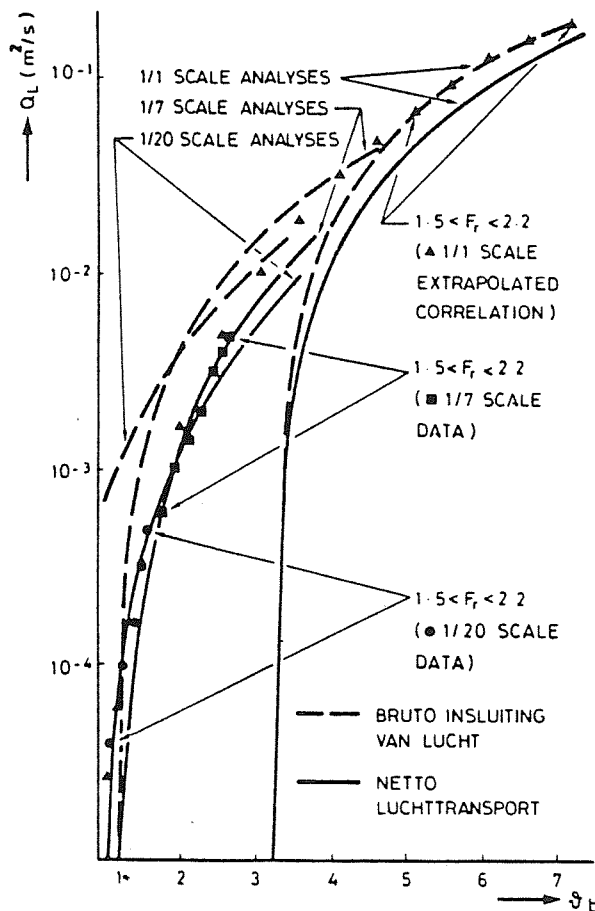
- schuimconcentratie $c = \frac{1}{2}$ (zie fig. B5.1)
- stijgsnelheid luchtbelletjes $u_{bel} = 0,25 \text{ à } 0,3$ m/s
- insluitparameter $\varepsilon = \frac{v_E}{v}$
- min. insluitsnelheid $v_c = 1$ m/s



Figuur B5.1

De uitdrukking van Thomas veronderstelt twee noodzakelijke voorwaarden voor luchttransport a) $Fr > 1$ (superkritische stroming)
 b) $v_b/v_c > 1$ (of $v_b > 1$ m/s).

Figuur B5.2 geeft een grafische voorstelling van vergelijking 3 voor prototype-afmetingen en schaal 1:7 en 1:20 voor zowel q_{at} als q_{an} (m^2/s). Daarnaast zijn de modelresultaten van Casteleyn weergegeven, die tevens naar prototype zijn geëxtrapoleerd.



Figuur B5.2

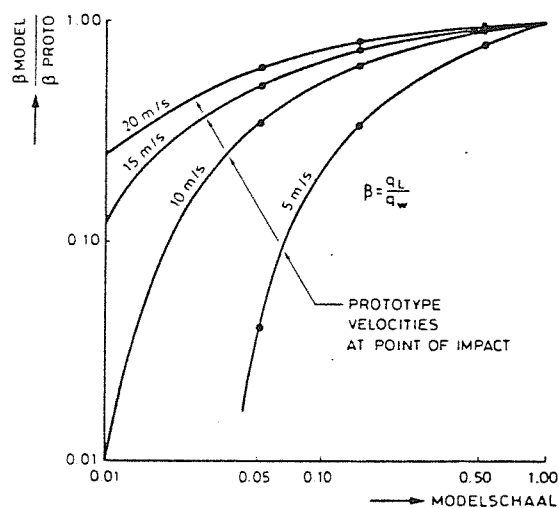
Ervine en Ahmed [5]

Deze auteurs beschrijven proefnemingen in een verticale schacht waarbij totale luchtinsluiting q_{at} , recirculatie en netto luchttransport q_{an} zijn bestudeerd. Voor diverse valhoogtes en straaldiktes vonden zij als beste correlatie

$$q_{at} = 0,00045 (v_b - 0,8)^3 \quad (4)$$

Uit deze uitdrukking valt af te lezen dat schaalearfenen zijn te verwachten, immers $v_{min} = 0,8$ is schaalonafhankelijk. Via diagram van figuur B5.3 is een indruk van deze schaalafhankelijkheid te verkrijgen. Met formule (4) berekenden zij bij diverse v_o en schalen de verhouding:

$$\beta_{model} / \beta_{proto} \quad (\beta = q_L / q_w)$$



Figuur B5.3

Voor de bepaling van het netto luchttransport is opgesteld de grafiek van figuur 9 waarin $\alpha_E = q_{an} / q_{at}$ is uitgezet tegen v_{out} (outlet velocity); vergelijkbaar met \underline{v}_o in hevelbenen (eigenlijk $v_o^*/2$). Bij snelheden $v_{out} > 0,6$ m/s blijkt α_E konstant = 0,8). Hier is duidelijk het tweede schaalearfenen zichtbaar. $v_{o_{min}}$ is konstant ($\approx 0,25$ à $0,3$ m/s). Voor $q_L = q_{an}$ geldt dus

$$q_L = 0,00045 \alpha_E (v_b - 0,8)^3 \quad (4')$$

Vergelijking 4 vertoont sterke overeenkomst met formule van Casteleyn

$$q_L = \alpha_c (v_b - 0,8)^3 \quad (5)$$

waarbij α_c een funktie van h_a is. Deze varieert van $\alpha_c = 0$ bij $h_a = 4,40$ m via $\alpha_c = 0,00045$ bij $h_a = 5,20$ m tot $\alpha_c = 0,00105$ bij $h_a = 5,80$ m.

In het kader van W.L. Speurwerk (S330) [6] heeft Ervine voor een situatie als in de hevels afgeleid dat

$$q_{an} = K F_r^2 \left(1 - \frac{v_c}{v_b}\right) \left(1 - \frac{v_r}{v_o}\right) * q_w \quad (6)$$

waarbij: v_r is minimum snelheid waarbij lucht getransporteerd wordt en is o.a. afhankelijk van stijgsnelheid van luchtbellens en de hellingshoek (voor $1 < Fr < 2$, varieert v_r van 0,6 naar 0,4 m/s).

$v_c = 0,8 - 1,2$ m/s. (De minimum snelheid waarbij lucht wordt ingesloten).

$$K = 6 * 10^{-3}$$

$$Fr = v_b / \sqrt{gd_b}$$

Uit

$$q_{an} = \alpha_E \cdot 0,00045 (v_b - 0,8)^3 \quad (4')$$

en

$$q_{an} = K F_r^2 \left(1 - \frac{v_c}{v_b}\right) \left(1 - \frac{v_r}{v_o}\right) q_w \quad (6)$$

zou kunnen worden afgeleid dat:

$$\alpha_E = \frac{0,006 F_r^2 \left(1 - \frac{v_c}{v_b}\right) \left(1 - \frac{v_r}{v_o}\right) q_w}{0,00045 (v_b - v_c)^3}$$

$$\alpha_E = \frac{0,006 \frac{v_b^2}{gd_b} \left(1 - \frac{v_c}{v_b}\right) \left(1 - \frac{v_r}{v_o}\right) v_b d_b}{0,00045 \left(1 - \frac{v_c}{v_b}\right)^3 v_b^3}$$

$$\alpha_E = 1,36 \left(1 - \frac{v_c}{v_b}\right)^{-2} \left(1 - \frac{v_f}{v_o}\right) \quad (7)$$

in het geval van de hevel.

BIJLAGE 6 - Bepaling van de insluitsnelheid v_b

Allereerst zijn in figuur B1 en B2 de in model (M1347 en M1348) gemeten snelheden uitgezet als functie van ΔH en h_a voor zowel de stationaire als de dynamische situatie (het onderzoek M1347 (schaal 1:20) leverde maar een beperkt aantal gegevens). De figuren B3 en B4 geven voor de situatie $\Delta H = 1,60$ een vergelijking tussen de berekende snelheid (volgens één van de hieronder aangegeven methodes) en de gemeten waarden.

Bepaling van de snelheid v_b (bij stationaire stroming) is mogelijk uit:

I) het totale energieverlies volgens:

$$\Delta H = \xi_{\text{tot}} \frac{v_o^2}{2g} + \frac{(v_b - v_o)^2}{2g} + \xi_{\text{kor}} \frac{v_o^2}{2g} \quad (1)$$

$$v_o = v_{\text{gem}} = Q/(b \cdot b)$$

b = breedte (en hoogte = 3,2 m) van de koker

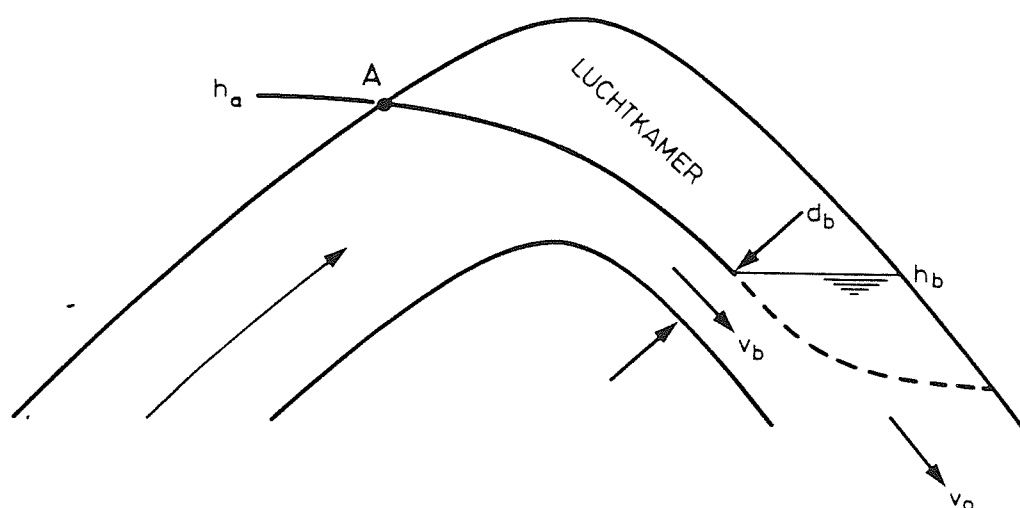
ξ_{tot} = totale energieverliescoëfficiënt

ξ_{kor} = korrektieverliescoëfficiënt.

De tweede term uit het rechterlid van vergelijking (1) is het "Carnot-verlies" veroorzaakt door de plotselinge verwijding van de straal met dikte d_b nadat deze in het benedenbeen de waterspiegel op niveau h_b bereikt heeft (fig. B6.1). De geldigheid van het gebruik in een dergelijke situatie wordt onder IV) aangetoond.

De correctie op de verliezen is noodzakelijk omdat

- 1) niet het gehele bochtverlies in de kroon optreedt, omdat niet de gehele bocht met water gevuld is
- 2) er een extra knikverlies optreedt (de knik in punt A van fig. 3.1).



Figuur B6.1

De absolute waarde van ξ_{kor} is voorlopig onbekend, maar lijkt erg klein en wordt dan ook in eerste instantie verwaarloosd.

Uit (1) volgt:

$$(v_b - v_o)^2 = 2g\Delta H - \xi_{tot} v_o^2 \quad (2)$$

dus:

$$v_b = v_o + \sqrt{2g\Delta H - \xi_{tot} v_o^2} \quad (3)$$

Bekend dienen hierbij te zijn ΔH , Q (voor v_o) en de ξ_{tot} . De invloed van deze grootte valt enigszins uit figuur B3 af te leiden doordat v_b bepaald is met $\xi = 1,5$, $\xi = 1,85$ en $\xi = 2,00$.

II) Het modelonderzoek

Door het gebruik van figuur 10, waarin d_b is uitgezet als functie van h_a en ΔH . Uit foto's van de betreffende situatie in model is d_b opgemeten. Gebruik in prototypesituaties verondersteld geometrische gelijkvormigheid (gelijke h_a en h_b).

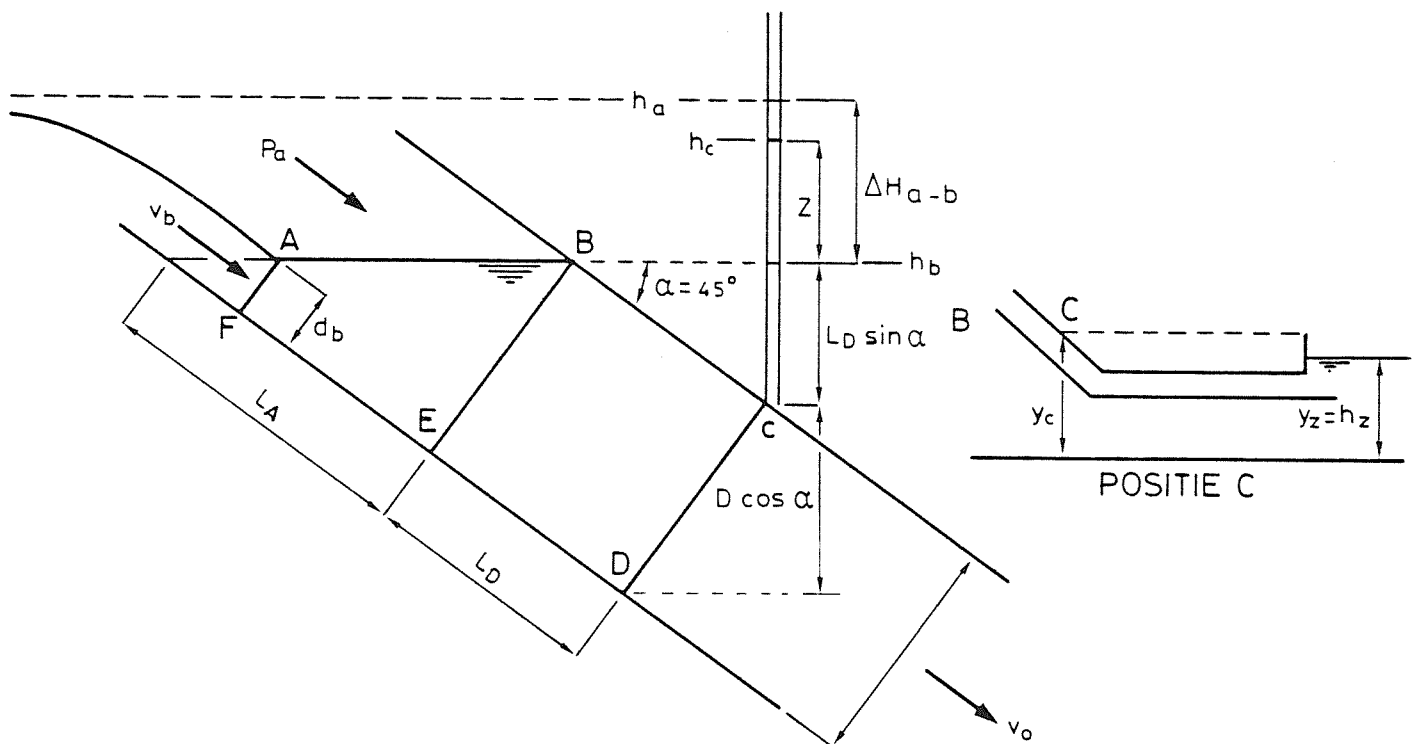
III) Het gebruik van de gemeten ΔH , p_{12} en Q

Uitgangspunt is de positie van het piezometrische niveau in een punt C (h_c) waarvan de ligging bekend is (fig. B6.2).

$$H_c = h_2 + \xi_2 \frac{v_o^2}{2g} \quad (\text{energiehoogte}) \quad (4)$$

ξ_2 verliescoëfficiënt voor traject (c-uitstroming)

$$h_c = h_2 + (\xi_2 - 1) \frac{v_o^2}{2g} \quad (\text{piëzometrisch niveau}) \quad (5)$$



Figuur B6.2

Op vloeistofdeel FABCD wordt de impulsvergelijking toegepast:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \rho g d_b^2 \cos \alpha + \text{gew (FABCD)} * \sin \alpha - \frac{1}{2} \rho g D (2z + 2L_D \sin \alpha + D \cos \alpha) \\ & + (p_a - p_N) \rho g D = \rho Q (v_o - v_b) \end{aligned} \quad (6)$$

N.B. p_a = druk in de kroon (in mwk)

p_N = atmosferische druk (in mwk)

$Q = v_o D$.

Nu is gewicht

$$\begin{aligned} (\text{FABCD}) * \sin \alpha &= (\rho g L_D + \frac{1}{2} \rho g (D \frac{D}{\text{tg} \alpha} - d_b \frac{d_b}{\text{tg} \alpha})) \sin \alpha D \\ &= \rho g L_D D \sin \alpha + \frac{1}{2} \rho g (D^2 \cos \alpha - d_b^2 \cos \alpha) \end{aligned} \quad (7)$$

(26) in (25) levert:

$$(p_a - p_N) \rho g D - \rho g D z = \rho Q (v_o - v_b) \quad (8)$$

of (als $p_a - p_N = p'_a$ (onderdruk))

$$p'_a - z = \frac{v_o (v_o - v_b)}{g} \quad (9)$$

$$\text{dus } z = p'_a - \frac{v_o (v_o - v_b)}{g} \quad (10)$$

Er geldt dat

$$\Delta H_{a-b} = h_a - h_c + z \quad (\text{zie fig. B6.2}) \quad (11)$$

Is h_a nog niet bekend, dan kan deze berekend worden uit:

$$H_a = h_a + p_a + \frac{v_a^2}{2g} \quad (12a)$$

en

$$H_a = H_1 - \xi_1 \frac{v_o^2}{2g} = h_1 + p_1 - \xi_1 \frac{v_o^2}{2g} \quad (12b)$$

Hierbij is: ξ_1 verliescoëfficiënt voor traject (instroming-kroon)

p_1 druk bovenstrooms (= p_N)

p_a druk in de kroon (= p_{12})

$$\text{dus: } h_a = h_1 + p_N - p_a - \xi_1 \frac{v_o^2}{2g} - \frac{v_a^2}{2g} \quad (13)$$

als wordt aangenomen dat:

$$\frac{v_a^2}{2g} = \xi_a \frac{v_o^2}{2g} \quad (14)$$

en

$$\xi_1' = (\xi_1 + \xi_a) \quad (15)$$

(terwijl $p_N - p_a = -p_a^1$)

dan is:

$$h_a = h_1 - p_a^1 - \xi_1' \frac{v_o^2}{2g} \quad (16)$$

$$\text{Nu is } v_b = \sqrt{2g\Delta H_{a-b}} \quad (\text{zie fig. B6.2}) \quad (17)$$

dus kan (10) worden geschreven als

$$z = p_a^1 - \frac{v_o (v_o - \sqrt{2g\Delta H_{a-b}})}{g} \quad (18)$$

of

$$\frac{g(z - p_a^1) + v_o^2}{v_o} = \sqrt{2g\Delta H_{a-b}} \quad (19)$$

met

$$\Delta H_{a-b} = h_a - h_c + z \quad \text{en } A = \frac{g}{v_o} \quad \text{en } B = v_o - \frac{gp_a^1}{v_o}$$

volgt

$$A^2 z^2 + 2 ABz + B^2 = 2g (h_a - h_c + z) \quad (20)$$

uit

$$A^2 z^2 + 2 (AB-g)z + B^2 - 2g (h_a - h_c) = 0 \quad (21)$$

is z op te lossen:

$$z = \frac{-2(AB-g) \pm \sqrt{(2(AB-g))^2 - 4A^2(B^2 - 2g(h_a - h_c))}}{2A^2} \quad (22)$$

en dan volgt ΔH_{a-b} uit (11) en is:

$$v_b = \sqrt{2g\Delta H_{a-b}} \quad (17)$$

In figuur B4 is een uit modelresultaten berekende grafiek weergegeven, en wel op twee wijzen:

IIIa, waarbij de waarde h_a berekend is volgens formule (13) uit q , p_1 , h_1 , h_2 en ξ_1

IIIb, waarbij de waarde van h_a direct uit de meting is ingevoerd.

Opmerkingen:

1) Het energieverlies over FABCD bedraagt:

$$\Delta H = h_b + \frac{v_b^2}{2g} - \left(h_c + \frac{v_o^2}{2g} \right) + p'_a \quad (23)$$

nu is $h_c = h_b + z$, dus:

$$\Delta H = h_b + \frac{v_b^2}{2g} - \left(h_b + z + \frac{v_o^2}{2g} \right) + p'_a \quad (24)$$

en

$$z = p'_a - v_o(v_o - v_b)/g \quad (10)$$

dus

$$\Delta H = \frac{v_b^2}{2g} - \frac{v_o^2}{2g} - \frac{v_o (v_b - v_o)}{g} = \frac{v_b^2 - 2 v_o v_b + v_o^2}{2g} \quad (25)$$

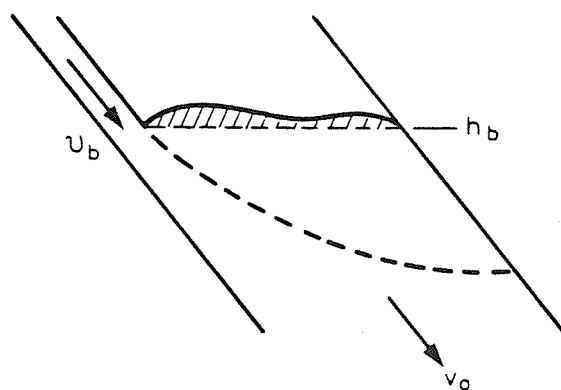
Met andere woorden:

$$\Delta H = \frac{(v_b - v_o)^2}{2g}$$

(een uitdrukking die geheel overeenkomt met het "gewone" vertragingverlies volgens Carnot).

2) Uit figuur 4 blijkt dat de waterspiegel AB op niveau h_b zelden geheel vlak (horizontaal) is.

Wordt v_b opgevat als snelheid op het insluitpunt, dan werkt als gewicht in de impulsbalans een gewicht dat "iets" groter is dan in bovenstaande afleiding is verondersteld. En wel dat deel dat boven h_b gelegen is (fig. B6.3) waardoor z en v_b iets kleiner zullen zijn dan is afgeleid.



Figuur B6.3

- 3) Van belang is de overweging dat over traject AD geen wrijvingsverlies plaatsvindt. Dit moet dus zo kort mogelijk zijn. Anders gezegd, h_c moet bekend zijn in een punt dat zo dicht mogelijk bij het insluitpunt ligt.
- 4) Het blok AFEB kan 'veel' lucht bevatten waardoor de ρ wat lager is dan bij puur water en dus kan h_b "iets" hoger liggen.

IV) Het gebruik van gemeten h_a en h_b

In het proto-onderzoek zullen h_a en h_b direkt gemeten worden. Hieruit kan

$$\Delta H'_{a-b} = h_a - h_b \quad (26)$$

bepaald worden, dan is

$$v_b = \sqrt{2g \Delta H'_{a-b}} \quad (27)$$

In figuur B3 is v_b , berekend uit model gegevens voor $\Delta H = 1,60$ m voor h_a en h_b , weergegeven.

Deze grafiek blijkt één van de meest belovende te zijn voor de modelresultaten.

Bijlage 7: Debietbepaling: IJking van de Ottmolen

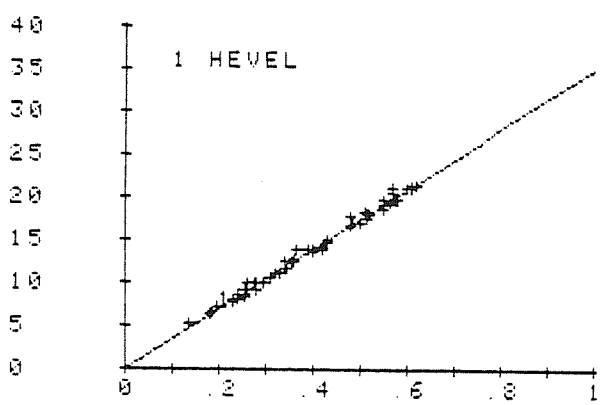
Hieronder zijn weergegeven voor 1, 2 en 6 kokers, de relaties: $Q = k_0$ (1)

Overigens is voor 0 niet het aantal omwentelingen, maar de geleverde spanning (in Volt) gebruikt, omdat deze spanning recht evenredig is met het aantal omwentelingen.

De relaties zijn met een "curve-filting"-programma bepaald.

1 HEVEL

I	X(I)	Y(I)
1	0.1800	6.2700
2	0.1840	6.6000
3	0.2760	9.9000
4	0.3400	12.3750
5	0.3640	13.8600
6	0.4240	14.6850
7	0.4320	15.0150
8	0.2560	8.5800
9	0.3120	10.5600
10	0.3440	11.7150
11	0.2320	7.7550
12	0.6200	21.4500
13	0.2560	9.0750
14	0.2600	9.0750
15	0.2500	9.2400
16	0.4320	14.8500
17	0.5600	21.1200
18	0.5600	20.6250
19	0.2800	9.0750
20	0.4000	13.6950
21	0.5150	18.1500
22	0.5200	17.9650
23	0.4800	17.6550
24	0.4800	16.6650
25	0.5150	17.4900
26	0.4840	16.8300
27	0.3536	12.8800
28	0.3400	11.5500
29	0.2600	9.9000
30	0.1944	7.0950
31	0.1360	5.3790
32	0.3280	11.0550
33	0.2280	7.9200
34	0.4320	14.6850
35	0.5520	18.5790
36	0.5520	19.3050
37	0.5640	19.5360
38	0.5520	19.1400
39	0.5520	19.2000
40	0.5120	18.4140
41	0.3200	11.2200
42	0.4000	13.8600
43	0.4000	13.8600
44	0.4000	13.8600
45	0.4200	14.1900
46	0.3920	13.9260
47	0.3600	12.3750
48	0.2800	9.9660
49	0.2400	8.5800
50	0.5000	16.9950
51	0.5600	19.6350
52	0.2560	8.2500
53	0.4200	14.0250
54	0.2960	9.9000
55	0.6000	21.4500
56	0.6000	21.1200
57	0.6000	21.1860
58	0.5760	19.8000
59	0.5200	18.1500
60	0.5800	19.8000
61	0.3600	12.8700
62	0.2400	8.0850



```

          ANOVA: LINEAR REG: CODE 1
SOURCE/DF      SS      MS      F
TOTAL 61      1318.5
REG 1         1307.1    1307.1  999.9
RESID 60         11.4      0.2
R SQUARE =                0.991

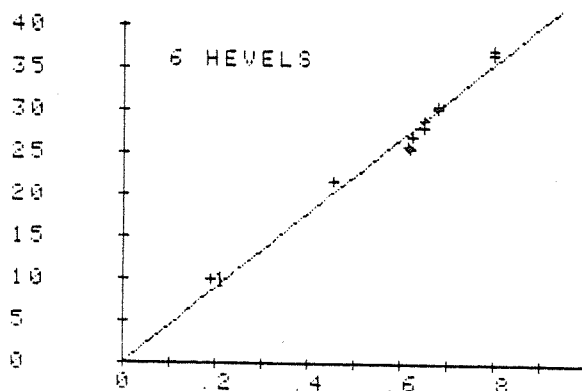
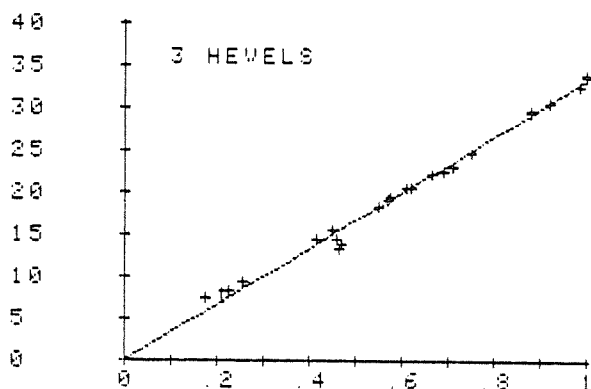
YHAT =      -0.001 +      34.900 X
    
```

3 HEVELS

I	X(I)	Y(I)
1	0.4720	13.9550
2	0.4640	13.9650
3	0.9200	20.5250
4	0.7480	24.5510
5	0.7130	23.1000
6	1.0000	33.9240
7	1.0000	33.4950
8	0.9840	32.5850
9	0.8800	29.7000
10	0.8800	29.3700
11	0.8920	29.6350
12	0.6640	22.1100
13	0.4600	14.5200
14	0.5520	18.2160
15	0.6080	20.6250
16	0.6200	20.6250
17	0.5760	19.3710
18	0.5680	19.3850
19	0.4160	14.5200
20	0.4480	15.6750
21	0.1760	7.4250
22	0.2560	9.4850
23	0.2240	8.2500

5 HEVELS

I	X(I)	Y(I)
1	0.6200	25.5750
2	0.6160	25.9850
3	0.6240	26.8950
4	0.6520	28.0500
5	0.6520	28.7760
6	0.6800	30.6600
7	0.6800	30.6900
8	0.1920	9.9800
9	0.4560	21.7800
10	0.8000	36.6960
11	0.8000	37.1250



AOV: LINEAR REG: CODE 1

SOURCE/DF	SS	MS	F
TOTAL 32	4428.1		
REG 1	4413.2	4413.2	999.9
RESID 31	14.9	0.5	

R SQUARE = 0.997

YHAT = 0.079 + 33.138 X

AOV: LINEAR REG: CODE 1

SOURCE/DF	SS	MS	F
TOTAL 22	4865.3		
REG 1	4849.5	4849.5	999.9
RESID 21	15.8	0.8	

R SQUARE = 0.997

YHAT = 0.045 + 44.408 X

BIJLAGE 8 - Berekening gatdiameters van de flens voor de beluchtungsafsluiters

Bepaling van de gatopening in de smoorflens van afsluiter A aan de hand van tot op heden (14/9'83) beschikbare meetresultaten.

B8.1 Algemeen

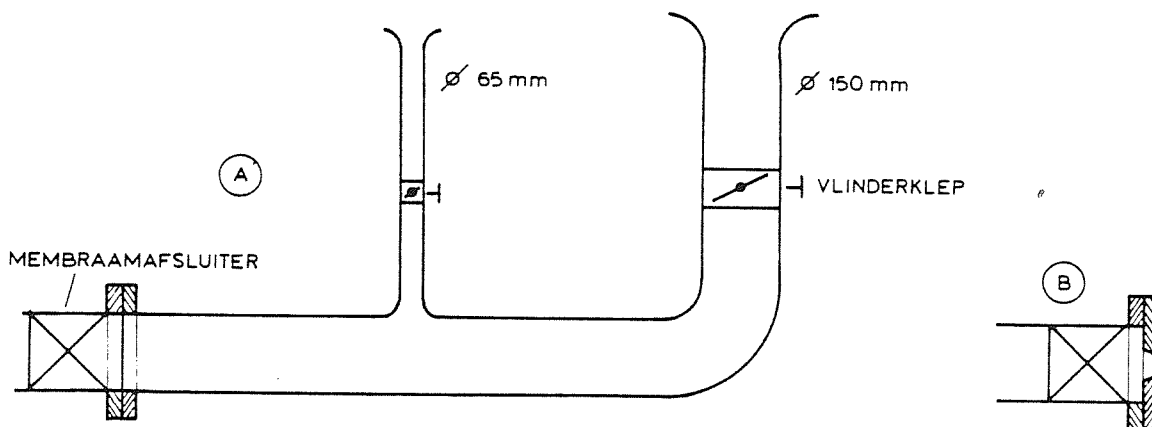
Uit de proefregistraties blijkt dat het afslagproces rustig verloopt als via W.L. meetsysteem wordt afgeslagen via vlinderklep in $\varnothing 150$ bij een klepstand $\alpha/\alpha_t = 0,4$.

De hevel is dan "afgeslagen" in 1 min en 15 s bij $\Delta H = \pm 0,10$. Na deze 1 min 15 s is de h_a (waterstand in Grevelingenbeen) lager dan het kroonpeil van 3,00 m + NAP. De h_a is op "Grevelingenpeil" na ± 7 min.

De indruk bestaat dat sneller afslaan (zonder klappen, te grote waterstandschommelingen e.d.) zeer wel mogelijk is. Om meettechnische redenen (kwetsbaarheid van de kelkbaken) durven we in dit stadium, met nog vele proeven te doen, evenwel niet veel sneller af te slaan.

De hieronder aangegeven opening is dus zeker aan de veilige kant.

B8.2 Berekening weerstand meetsysteem



Figuur B8.1

De verliezen van meetsysteem (A) moet corresponderen met verlies over smoorflens (B). Zie figuur B8.1.

Verliezen in het meetsysteem bestaan uit:

inlaatverlies : ξ_i
 bochtverlies : ξ_b
 wrijvingsverlies: ξ_w
 klepverlies : ξ_k

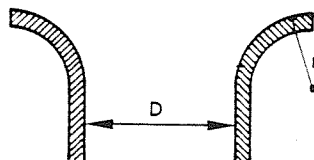
dus:

$$\xi = \xi_i + \xi_b + \xi_w + \xi_k$$

B8.2.1 Inlaatverlies

bij $\frac{r}{D_H} = \frac{40}{150} = 0,27$ is $\xi_i = 0,03$

voor cirkelprofiel geldt: $D_H = D$



Figuur B8.2

B8.2.2 Bochtverlies (bijlage 8.4)

$$\frac{R}{D} = \frac{1,5D}{D} = 1,5$$

$$Re = \frac{v_o D_H}{\nu}$$

$$Q = 0,8 \text{ m/s}$$

$$v_o = (0,8/\pi D^2) * 4 = 45,27 \text{ m/s}$$

$$Re = 4,5 * 10^6$$

Voor gegalvaniseerd staal is $\Delta = 0,1 \text{ mm}$.

$$\bar{\Delta} = \Delta/D_H = 6,7 * 10^{-4} \rightarrow k_{Re} = 1$$

$$\rightarrow k_{\Delta} = 1,67$$

$$\xi_b = 1 * 1,67 * A_1 B_1 C_1 \quad \begin{array}{l} A_1 = 1 \\ B_1 = 0,17 \\ C_1 = 1 \end{array}$$

$$\xi_b = 0,28$$

Wrijving in de bocht $\xi_{bw} = 0,0175 \lambda \frac{R_o}{D_M} \delta = 0,04$

λ volgt uit R_e en Δ ($\lambda = 0,018$)

B8.2.3 Wrijvingsverlies

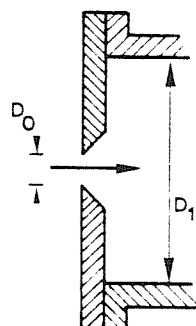
$$\xi_w = \lambda \frac{1}{D_H} = 0,018 \frac{3,2}{0,15} = 0,38$$

B8.2.4 Klepverlies

ξ_k volgt uit bijlage 8.5.

$$\alpha/\alpha_t = 30/75 = 0,4 \text{ (open)}$$

$$\rightarrow \xi_k = 31 \text{ (bij 0,6 dicht)}$$



Figuur B8.3

B8.2.5 Totale verlies

$$\xi = \xi_i + \xi_b + \xi_k + \xi_w$$

$$= 0,03 + 0,28 + 31 + 0,38 + 0,04 = 31,74$$

B8.3 Smoorflens

Het verlies over de smoorflens dient dus $\xi = 32$ te zijn.

Uit Bijlage 8.6 blijkt dat dan $F_o/F_1 = 0,24$ d.w.z. $D_o/D_1 = \sqrt{0,24} = 0,49$

Dus: $D_o = 0,49 * 150 = 73,5$ mm (fig. B8.3).

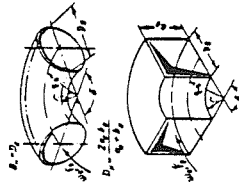
Bijlage 8.4 Uit [14]

MÉMENTO DES PERTES DE CHARGE

6.4. DIAGRAMMES DES COEFFICIENTS DE PERTE DE CHARGE

Coudes à parois concentriques, pour $0.5 < R_e/D_w < 1.5$ et $0 < \delta^* \leq 180^\circ$

Chapitre VI
Diagramme 6.1



1) Parois lisses ($\lambda = 0$) et $Re = \frac{v_w D_w}{\nu} \geq 2 \cdot 10^4$

$$f = \frac{\Delta H}{L} = f_w + f_r$$

ou

$$f_r = 0.0175 \lambda \frac{R_e}{D_w} \delta^*; \text{ pour } \lambda = 0.02; f_w = 0.00035 \frac{R_e}{D_w} \delta^*$$

f_w est exprimé en fonction de δ^* sur le graphique a) ou approximativement dans le tableau 6.2

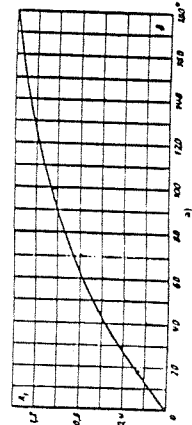
Tableau 6.2

δ^*	$< 70^\circ$	90°	$> 100^\circ$
f_w	$0.9 \sin \delta^*$	1.0	$0.7 + 0.35 \frac{\delta^*}{90^\circ}$

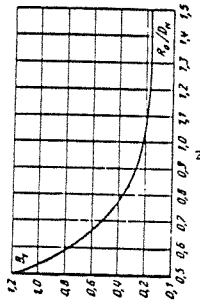
f_r est exprimé en fonction de R_e/D_w sur le graphique b) ou approximativement dans le tableau 6.3

Tableau 6.3

R_e/D_w	0.5 - 1.0	> 1.0
f_r	$\frac{0.21}{(R_e/D_w)^{1.1}}$	$\frac{0.21}{\sqrt{R_e/D_w}}$



δ^*	0	20	30	45	60	75	90	110	130	150	180
f_w	0	0.31	0.45	0.60	0.78	0.90	1.00	1.13	1.20	1.26	1.40



R_e/D_w	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.25	1.50
f_r	1.18	1.07	1.01	0.97	0.94	0.92	0.87	0.82

COUDES, TRONÇONS COURBES

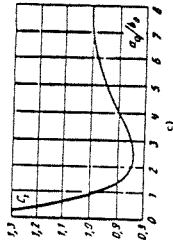
Coudes à parois concentriques, pour $0.5 < R_e/D_w < 1.5$ et $0 < \delta^* \leq 180^\circ$

Chapitre VI
Diagramme 6.1

(suite)

C_1 est exprimé approximativement en fonction de $\frac{R_e}{D_w}$ sur le graphique c) (pour une section arrondie ou carrée $C_1 = 1$).

$\frac{R_e}{D_w}$	0.25	0.50	0.75	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
C_1	1.30	1.17	1.07	1.00	0.90	0.85	0.85	0.90	0.95	0.98	1.00	1.00



2) Parois rugueuses ($\lambda > 0$) et $Re \leq 2 \cdot 10^4$:

$$f = \frac{\Delta H}{L} = k_w k_r f_w + f_r$$

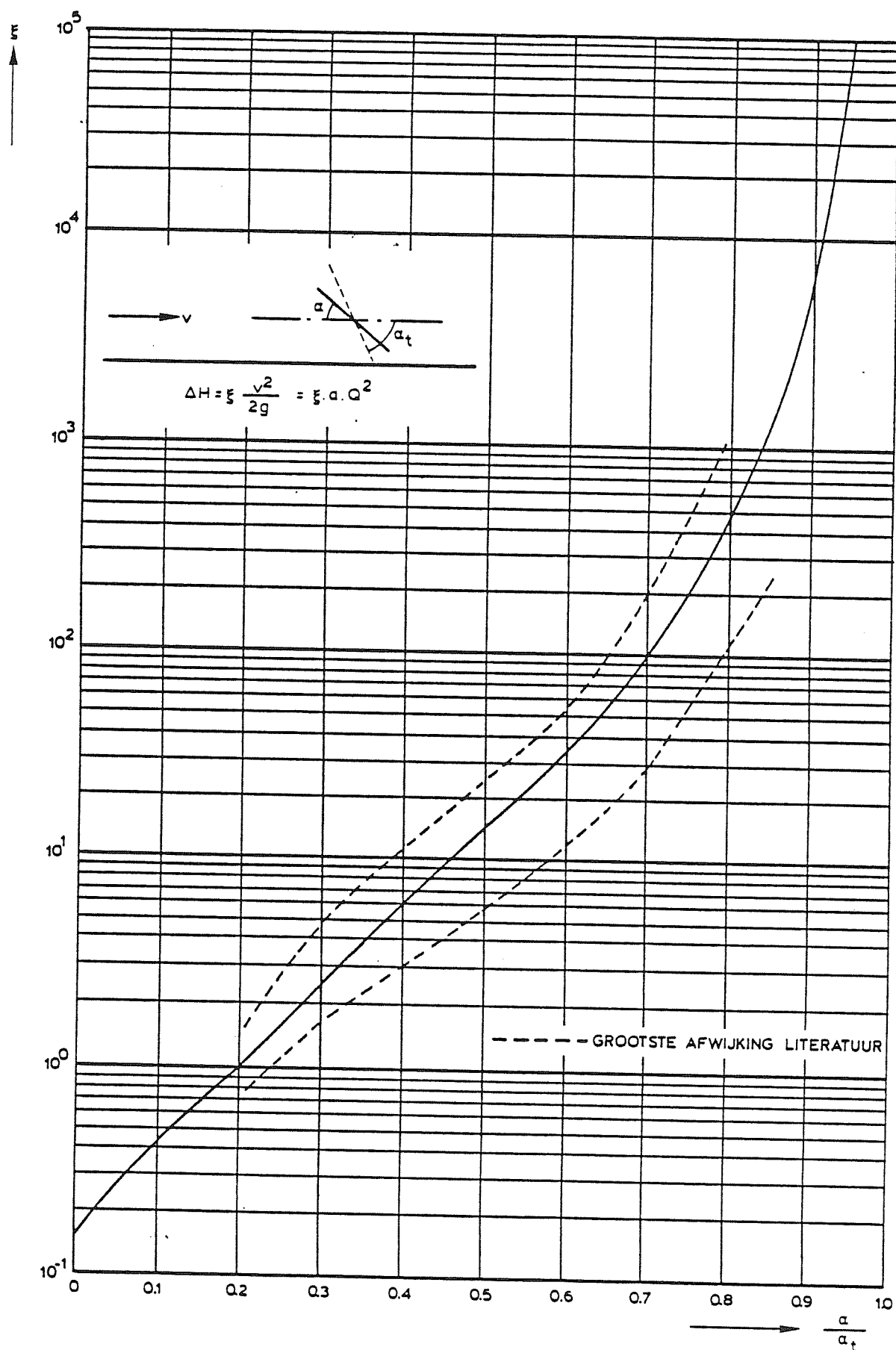
où k_w et k_r sont déterminés en fonction de Re et $\lambda = \frac{\Delta}{D_w}$ sur le tableau 6.4 (approximativement)

Tableau 6.4

λ	0.5 - 0.55		0.55 - 1.5			
	Re					
	$3 \cdot 10^4 - 4 \cdot 10^4$	$> 4 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4 - 4 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^5$		
k_w	k_r	k_w	k_r	k_w	k_r	
0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
0 - 0.001	$45 \lambda_{Re}$	1.0	$64 \lambda_{Re}$	1.0	$64 \lambda_{Re}$	1.0
> 0.001	$45 \lambda_{Re}$	$1 + 0.5 \cdot 10^{-4} \lambda$	$64 \lambda_{Re}$	$1 + 0.5 \cdot 10^{-4} \lambda$	$64 \lambda_{Re}$	$1 + 0.5 \cdot 10^{-4} \lambda$
	$45 \lambda_{Re}$	1.0	$64 \lambda_{Re}$	1.0	$64 \lambda_{Re}$	1.0
	$45 \lambda_{Re}$	1.0	$64 \lambda_{Re}$	1.0	$64 \lambda_{Re}$	1.0

λ_{Re} et λ_{λ} sont égaux à λ des tubes lisses industriels (1.1.3.1) déterminés pour Re donné sur le diagramme 1.1.3.1. λ_{λ} et λ_{Re} sont égaux à λ des tubes rugueux ($\lambda > 0$) déterminés pour Re et $\lambda = \frac{\Delta}{D_w}$ donnés sur les diagrammes 1.1.3.2, 1.1.3.3. Les valeurs de ν sont données dans § 1.1.3.1, celle de δ dans le tableau 1.1.

Bijlage 8.5 Verliescoëfficiënt als functie van de opening bij een vlinderklep



Bijlage 8.6 Uit [14]

ÉLARGISSEMENTS BRUSQUES, DIAPHRAGMES, CLAPETS

Diaphragme ou ouverture à bords effilés ($l/D_H = 0$ à $0,015$) dans une conduite ou un canal rectiligne	Chapitre IV Diagramme 4.13
---	-------------------------------

1) $Re = w_0 D_H / \nu \geq 10^3$:

$$\zeta = \frac{\Delta H}{\gamma w_1^2} = \left(1 + 0,707 \sqrt{1 - \frac{F_0}{F_1} - \frac{F_0}{F_1}} \right) \left(\frac{F_1}{F_0} \right)^2$$

ζ est déterminé sur la courbe $\zeta = f(F_0/F_1)$

2) $Re < 10^3$ (approximativement) :

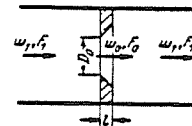
$$\zeta = \frac{\Delta H}{\gamma w_1^2} = \left[\zeta_0 + \bar{\epsilon}_0^{Re} \left(\zeta_0 - \frac{F_0}{F_1} \right)^2 \right] \left(\frac{F_1}{F_0} \right)^2$$

où : ζ_0 est déterminé par les courbes

$$\zeta_0 = f_1(Re, F_0/F_1)$$

du graphique a) dans le diagramme 4.10 ;

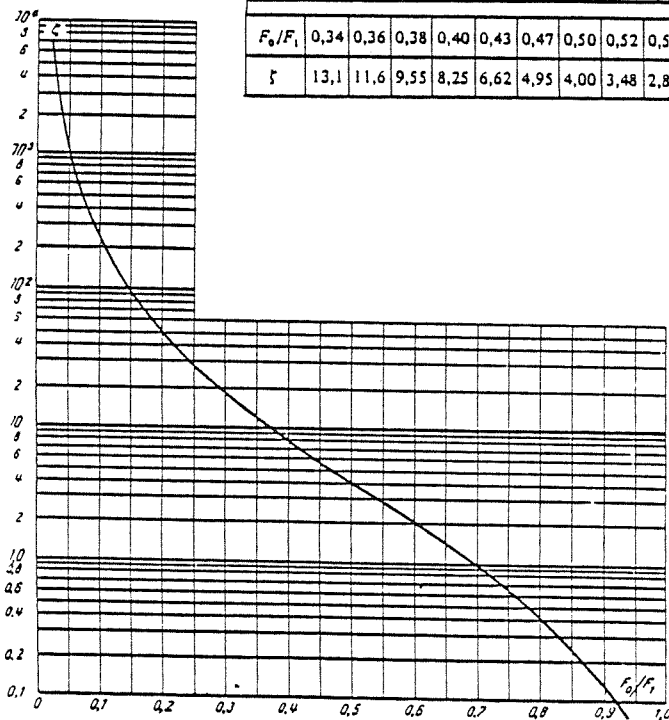
$D_H = 4F_0/\Pi_0$; Π_0 : périmètre



$\bar{\epsilon}_0^{Re}$ est déterminé par la courbe $\bar{\epsilon}_0^{Re} = f_2(Re)$ du même graphique a) dans le diagramme 4.10 ;

$\zeta = 1 + 0,707 \sqrt{1 - F_0/F_1}$ est déterminé par la courbe du graphique b) dans le même diagramme 4.10 ;

Les valeurs de ν sont données dans le paragraphe 1.3, b).



F_0/F_1	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32
ζ	7000	3100	1670	1050	730	400	245	165	117	86,0	65,5	51,5	40,6	32,0	26,8	22,3	18,2	15,6
F_0/F_1	0,34	0,36	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,52	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
ζ	13,1	11,6	9,55	8,25	6,62	4,95	4,00	3,48	2,85	2,00	1,41	0,97	0,65	0,42	0,25	0,13	0,05	0

B8.7 Voorstel afsluiter B

Stel dat B voorzien wordt van een smoorflens waarvoor geldt:

$$a) F_0/F_1 = (D_0/D_1)^2 = (0,1/0,15)^2 = 0,44$$

$$b) \quad \quad \quad (0,09/0,15)^2 = 0,36$$

$$c) \quad \quad \quad (0,08/0,15)^2 = 0,28$$

F_0 = buisdiameter

F_1 = gatopening

dan is de $\xi_a = 6,0$

$\xi_b = 11,6$

$\xi_c = 22,3$

(over de flens, zie bijlage 8.6)

Korresponderende klepstand in meetflensen

		α/α_t dicht	α/α_t (open)
a)	$\xi_{\text{klep}} = \xi_{\text{tot}} - \xi_1 - \xi_b - \xi_w$ $= 6 - 0,03 - 0,28 - 0,04 = 5,65$	0,39 dicht	0,61
b)	$\xi_{\text{klep}} = 11,6 - 0,35 = 11,25$	0,48	0,52
c)	$\xi_{\text{klep}} = 22,3 - 0,35 = 19,95$	0,54	0,46

(uit bijlage 8.5)

BIJLAGE 9 - Proevenoverzicht

Proefnr.	datum	tijdstip	stroming	aantal	opmerking
1 t/m 5	9 sept		aanslaan en afslaan	1	geen a.d.m.
6 t/m 14	12 sept		aanslaan en afslaan	1	
15	13 sept	12.10-12.30	aanslaan	1	
16	13 sept	12.30-12.40	afslaan	1	
17	13 sept	12.55-13.05	aanslaan	1	
		13.05-14.25	stationair	1	
18	13 sept	14.30-14.50	aanslaan	1	
19	15 sept	14.40-15.00	aanslaan	3	
		15.05-15.15	afslaan	3	
20	15 sept	16.00-16.15	aanslaan	1	
		16.20-16.30	afslaan	1	
21	15 sept	16.40-18.30	stationair	1	
22	15 sept	18.30-18.35	afslaan	1	
23	16 sept	15.20-16.05	stationair	1	
24	16 sept	16.10-17.15	stationair	1	
25	16 sept	17.30-18.00	stationair	1	
26	16 sept	18.00-18.15	stationair+afslaan	1	
27	16 sept	18.25-19.20	aanslaan+stationair	1	
28	16 sept	19.20-19.50	volledig aan+afslaan	1	
29	19 sept	18.25-18.40	aanslaan+stationair	1	
30	19 sept	18.45-19.15	stationair	1	
31	19 sept	19.15-19.30	stationair	1	
32	19 sept	19.30-19.40	stationair	1	
33	19 sept	19.43-23.50	stationair	1	
34	19 sept	23.50-00.02	afslaan	1	
35	21 sept	20.00-20.25	aanslaan	6	
		20.25-22.00	volledig aan+stat.	6	
36	21 sept	22.50-01.10	volledig aan+stat.	3	
37	21 sept	01.10-01.15	afslaan	3	
38	26 sept	9.20-10.50	aanslaan+stat.	1	met schotbalken
39	26 sept	11.25-11.45	aanslaan	3	
40	26 sept	11.45-14.35	stationair	3	
		14.35-14.45	afslaan	3	
41	27 sept	19.40-10.15	aanslaan	2	
		10.15-15.00	volledig aan+stat.	2	
42	27 sept	15.00-15.10	afslaan	2	
43	28 sept	10.05-10.35	aan+afslaan	1	
44	28 sept	10.35-11.00	aan+afslaan	6	
45	28 sept	11.10-12.30	stationair	2	
46	28 sept	12.40-13.30	stationair	6	
47	28 sept	13.50-15.20	stationair	2	
48	28 sept	15.30-16.05	aan+afslaan	5	
49'	10 okt	9.20-10.25	aanslaan+stat.	3	met vlot
49''	10 okt	10.25-13.22	aanslaan+stat.	6	
50	10 okt	13.25-14.40	stat.+afslaan	6	
51'	11 okt	10.20-11.20	aanslaan+stat.	3	met vlot
51''	11 okt	12.25-14.50	aanslaan+stat.	3	

p.o. box 177

2600 mh delft

the netherlands