hoofdafdeling maatschappelijke technologie

organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek

nijverheidsorganisatie



hoofdafdeling maatschappelijke technologie

organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek

HET GEBRUIK VAN LUCHT VOOR DE BE-STUDERING OP MODELSCHAAL VAN STROMINGEN IN WATER

> door P.J.H. Builtjes

nijverheidsorganisatie



postbus 342 7300 AH apeldoorn

bezoekadres laan van westenenk 501

telex 36395 tnoap phone 055-77 33 44

Ref.no : 80-011061 Dossier: 8710-3599-002 Datum : September 1980

Opdrachtgever:

Hoofdafdeling Hydro-instrumentatie, Afd. Waterhuishouding en Waterbeweging Nijverheidsstraat 2 2288 BB Rijswijk "Voor de rechten en verplichtingen van de opdrachtgever met betrekking tot de inhoud van dit rapport wordt verwezen naar de Algemene Voorwaarden van TNO".

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotocopie, microfilm of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO. TNO aanvaardt geen enkele aansprakelijkheid met betrekking tot de inhoud en/of de vorm van deze uitgave. INHOUDSOPGAVE

1. INLEIDING	2
2. DE STROMING DOOR GESLOTEN LEIDINGEN	3
3. DE STROMING DOOR OPEN KANALEN	6
4. CONCLUSIES	9
5. LITERATUUR	10

3 FIGUREN

- 1 -

Pag.

1. INLEIDING

In het algemeen worden stromingsproblemen in water, zoals in kanalen, rivieren en estuaria, onderzocht in modellen waarbij als stromend medium ook water wordt toegepast. Vele laboratoria in binnen- en buitenland hebben op dit gebied een grote expertise opgebouwd. In een aantal gevallen is het mogelijk om luchtdoorstroomde modellen te gebruiken voor de bestudering van de stroming in water. Deze methode wordt echter opvallend weinig toegepast. Tot 1970 werd deze methode alleen gebruikt in de socialistische landen van Oost-Europa en bij het N.L.R. in Amsterdam, na 1970 incidenteel ook in West-Duitsland, Frankrijk en Portugal (ref. 1). Het gebruik van luchtdoorstroomde modellen heeft vele voordelen. Met name is het mogelijk om kleinere modellen toe te passen waarvan de constructie relatief eenvoudig is (geen lekkageproblemen), tevens is veelal de meetmethode in lucht eenvoudiger en is de meetnauwkeurigheid groter. Dit alles resulteert in een ordegrootte lagere kosten van een onderzoek met behulp van een model in lucht, dan in een watermodel. In het onderstaande zullen de mogelijkheden en beperkingen van het gebruik van modellen in lucht worden beschreven aan de hand van de zogenaamde schaalregels. Hierbij zal een onderscheid worden gemaakt tussen stromingen in gesloten leidingen, zoals deze bijvoorbeeld voorkomen in

leidingsystemen bij sluizen en hevels, en stromingen met een vrij opper-

vlak, zoals optreedt bij rivieren en kanalen.

- 2 -

2. DE STROMING DOOR GESLOTEN LEIDINGEN

Daar de randvoorwaarden voor de stroming op modelschaal (index m) en voor het prototype (index p) gelijk moeten zijn, zal in het model, op schaal, de geometrie van het prototype moeten worden nagebootst. Hierbij zullen alle stromingsbeïnvloedende vormen van het prototype moeten worden nagebootst, waarbij met name de ruwheid van de wanden waarlangs de stroming plaatsvindt een grote rol speelt.

Indien in de stroming dichtheids- en temperatuureffecten geen rol spelen, zal de stroming gekarakteriseerd kunnen worden door het Reynoldsgetal :

$$Re = \frac{U.D.}{v}$$
(1)

waarbij U de stroomsnelheid is, D de karakteristieke lengtemaat voor de stroming (b.v. de pijpdiameter), en U de kinematische viscositeit. Volledige gelijkvormigheid van de stroming in model en prototype zal nu optreden indien :

$$\frac{U_m D_m}{U_m} = \frac{U_p D_p}{U_p}$$
(2)

Op modelschaal zal qua orde van grootte gelden $U_m \approx 20 \text{m/s}$, $D_m \approx 0.1 \text{ m}$ terwijl de viscositeit van lucht 16.10⁻⁶ m²/s bedraagt.

Voor het prototype zal gelden $U_p \simeq 1 \text{ m/s}$, $D_p \simeq 5 \text{ m}$ (schaal 1 : 50), de viscositeit van water is 1,2 $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Dit leidt tot $\text{Re}_m \simeq 1,210^5$, $\text{Re}_p \simeq 4.10^6$. Het Re-getal voor het prototype is een factor 30 hoger dan het Regetal van het model hetgeen aanleiding kan geven tot verschillen tussen de stroming in het model en het prototype. Het blijkt echter dat boven een zeker Reynoldsgetal het patroon van de stroming, welke dan turbulent is, onafhan-kelijk is van het Reynoldsgetal.

Van deze Reynoldsgetal-onafhankelijkheid wordt bij zeer veel modelonderzoek gebruik gemaakt (ref. 2.). Deze onafhankelijkheid kan worden geïllustreerd aan het zogenaamde Moodydiagram, weergegeven in fig. 1 (ref. 3).

Het Moody-diagram geeft de zogenaamde weerstandscoefficient van een buis f als functie van het Reynoldsgetal en als functie van de relatieve ruwheid van de buiswand ε_Z/D waarbij ε_Z de equivalente zandkorrelruwheid is. Uit fig. 1 blijkt dat voor de turbulente stroming door ruwe buizen boven een zeker Reynoldsgetal de weerstandscoefficient, en daarmee de stroming onafhankelijk wordt van Reynolds. Echter, de stroming langs een glad oppervlak bevindt zich in het overgangsgebied, en is daarmee een functie van het Reynoldsgetal. Het op schaal volledig nabootsen van een stroming langs gladde wanden is dus gezien het verschil in Reynoldsgetal tussen model en prototype slechts beperkt mogelijk.

In vele gevallen zal echter de stroming in het prototype plaatsvinden langs ruwe wanden (hydraulisch ruw) en zich bevinden in het gebied van turbulente stroming door ruwe buizen. Als voorbeeld een stroming in het prototype met $\operatorname{Re}_{\widehat{p}} = 4.10^6$ en $\varepsilon_Z/D = 0,001$. Indien op grond van geometrische gelijkvormigheid in het model ook $\varepsilon_Z/D = 0.001$ wordt toegepast bevindt die stroming zich bij $\operatorname{Re}_m = 1.2.10^5$ in het overgangsgebied.

Tussen prototype en model is nu sprake van een verschil in weerstandscoefficient f, een volledige nabootsing van de stroming is nu niet mogelijk, het verschil in gedrag tussen prototype en model zal echter gering zijn. Indien in het prototype een wandruwheid aanwezig zou zijn van ε_z' D=0.015, is wel volledige gelijkvormigheid tussen prototype en modelschaal mogelijk. Bij een lagere wandruwheid in het prototype is de volgende procedure mogelijk. Het model kan geometrisch gelijkvormig, dus met dezelfde wandruwheid worden uitgevoerd, of het oppervlak van het model kan extra ruw worden gemaakt, zodanig dat de stroming in een gebied komt dat Reynoldsonafhankelijk is. In het eerste geval is er sprake van een Reynoldseffect tussen model en prototype, in het tweede geval komen de modelresultaten overeen met prototype-resultaten behorende bij een grotere wandruwheid. Door in deze situatie gebruik te maken van beide methoden kan een goede indruk worden verkregen van de te bereiken overeenkomst tussen model en prototype.

Deze methode van het extra verruwen van oppervlakten ten einde in een gebied met een effectief hoger Reynoldsgetal te geraken (op grond van Reynoldsonafhankelijkheid) wordt ook toegepast op de stroming rond cylinders (ref. 4), en voor het bestuderen van de stroming over heuvels en steden in meteorologische grenslaag windtunnels (ref. 5), zij het in deze situaties met een

- 4 -

80-011061/rhk

iets ander oogmerk dan in het bovenstaande geval.

Opgemerkt dient nog te worden dat instationaire stromingen in water niet kunnen worden nagebootst in luchtdoorstroomde modellen, met name op grond van de grote massatraagheidseffecten in water welke niet kunnen worden nagebootst in lucht, en het verschil in verhouding tussen karakteristieke tijdschalen en voortplantingssnelheden van verstoringen in prototype en model.

Concluderend kan worden gesteld dat het gebruik van luchtdoorstroomde modellen voor het onderzoek van waterstromingen door gesloten leidingen goed mogelijk is, indien de stroming in het prototype langs een vrij ruw oppervlak plaatsvindt. In de situatie van een gladder oppervlak in het prototype is voorzichtigheid bij de modelering geboden.

- 5 -

80-0110161/rhk

3. DE STROMING DOOR OPEN KANALEN

De stroming door open rivieren en kanalen vindt plaats ten gevolge van het hoogteverschil in het waterniveau tussen twee punten in stromingsrichting, het zogenaamde verhang.

In een luchtdoorstroomd model kan geen stroming op deze wijze onder invloed van de zwaartekracht plaatsvinden, terwijl tevens geen vrij oppervlak aanwezig is.

Stroming in lucht kan namelijk alleen plaatsvinden onder invloed van een drukgradient in gesloten kanalen of buizen. De nabootsing van een open kanaal met water zal dus moeten plaatsvinden in een gesloten kanaal in lucht, waarbij in plaats van de zwaartekracht de drukgradient de drijvende kracht van de stroming is.

Voor een open kanaal geldt de volgende uitdrukking :

$$(u_{\star})_{p} = \sqrt{-g h_{p} \left(\frac{\Delta z}{\Delta x}\right)_{p}}$$
(3)

Hierin is $(u_*)_p$ de wandschuifspanningssnelheid in het prototype, g is de versnelling van de zwaartekracht, h_p is de diepte van het kanaal en $(\Delta z/\Delta x)_p$ is het niveauverschil in de vertikaal op een afstand in stromings-richting Δx , het verhang (ref. 6).

Voor een volledig ontwikkelde turbulente stroming door een gesloten kanaal wat als model zal worden gebruikt, geldt (ref. 7) :

$$\rho_{\rm m}({\rm u}_{\star})_{\rm m}^{2} = -{\rm h}_{\rm m}(\frac{\Delta {\rm p}}{\Delta {\rm x}})_{\rm m} \tag{4}$$

Hierin is o_m de dichtheid van lucht, $(u_*)_m$ de wandschuifspanning in het model, h_m de <u>halve</u> hoogte van het model en $(\Delta P/\Delta x)_m$ het drukverschil over een afstand Δx .

Het snelheidsprofiel in prototype en model zal nu analoog zijn indien geldt :

$$(u_*/U)_m = (u_*/U)_p$$
 (5)

waarin U de gemiddelde snelheid is op een zekere referentiehoogte. Uit formule (3), (4) en (5) volgt als eis voor volledige gelijkvormigheid :

- 6 -

$$\frac{1}{\rho_{\rm m}} \left(\frac{\Delta P}{\Delta x}\right)_{\rm m} = \frac{U_{\rm m}^2}{U_{\rm p}^2} \cdot g \cdot \frac{h_{\rm p}}{h_{\rm m}} \left(\frac{\Delta z}{\Delta x}\right)_{\rm p}$$
(6)

Voor volledige simulatie moet de drukgradient in het model de waarde hebben die gegeven wordt door formule (6).

In samenhang met het bovenstaande zijn nu twee methoden mogelijk voor de simulatie van het vrije oppervlak. In de eerste plaats kan het vrije oppervlak worden gesimuleerd met een gladde, vlakke plaat (ref. 1). In Fig. 2 is schetsmatig het snelheidsverloop in een dergelijk gesloten kanaal weergegeven. Uiteraard moet de bodem een veel grotere ruwheid bezitten dan de vrije-oppervlak simulerende bovenplaat. Deze bovenplaat kan in principe zo worden ingesteld dat aan het gewenste drukverloop, opgegeven volgens formule (6), kan worden voldaan. Duidelijk is uit Fig. 2 dat simulatie slechts plaatsvindt tot aan de plaats waar de snelheid maximaal is, in wezen simuleert die hoogte het vrije oppervlak. Een tweede mogelijkheid van simulatie van het vrije oppervlak is het spiegelen of dubbel uitvoeren van het model, zoals geschetst in Fig. 3. In deze situatie hebben boven- en onderplaat dezelfde ruwheid en is de stroming symmetrisch ten opzichte van het midden van het kanaal. Dit midden simuleert het vrije oppervlak. Indien de boven en onderplaat evenwijdig zijn en er dus sprake is van een recht kanaal zal het snelheidsprofiel tot aan het midden van het kanaal logaritmisch zijn, zoals ook het snelheidsprofiel in een open kanaal logaritmisch is (ref. 7). In het rechte kanaal stelt zich volgens formule (4) een drukverloop in. Indien tevens voldaan wordt aan formule (5) zal in het model een drukverloop heersen dat voldoet aan formule (6).

Naast de bovengenoemde nabootsing van het verhang en het vrije oppervlak moet het model voldoen aan de voorwaarden beschreven bij de nabootsing van de stroming door gesloten leidingen.

Tenslotte moeten nog enkele opmerkingen worden gemaakt betreffende de nabootsing van het vrije oppervlak. Het zal duidelijk zijn dat direkte oppervlakte verschijnselen zoals golven, niet kunnen worden nagebootst. Tevens kunnen dispersieproeven niet worden gemodeleerd daar een verontreiniging geëmitteerd nabij de bodem in het luchtdoorstroomde model na verloop van tijd het gesimuleerde vrije oppervlak zal passeren, hetgeen in het prototype niet zal gebeuren. Hiermee is tevens aangegeven dat de turbulentie graad en schaal in het model nabij het gesimuleerde vrije oppervlak groter zal zijn dan in het prototype. Naast deze verschillen moet nog het volgende worden opgemerkt.

In de literatuur is bekend dat voor smalle kanalen het vertikale snelheidsprofiel in het midden van het kanaal gaat afwijken van het logaritmisch profiel. Dit manifesteert zich doordat de maximale snelheid niet langer optreedt op het vrije oppervlak, maar op enige afstand daaronder (ref. 8, 9).

Indien b/h = 5 (b is de breedte van het kanaal), is er sprake van een snelheidsverlaging aan het oppervlak van de ordegrootte van u_* , voor b/h > 10 is geen snelheidsverlaging meer aanwezig.

De verklaring van dit verschijnsel is onduidelijk, maar zal samenhangen met een interactie tussen vrij oppervlak en secondaire stromingen. Daar in een luchtdoorstroomd model geen echt vrij oppervlak aanwezig is, zal dit verschijnsel in een dergelijk model niet kunnen worden nagebootst. Hiermee is de simulatie van open kanalen en rivieren met een luchtdoorstroomd model beperkt tot niet te smalle kanalen.

- 8 -

4. CONCLUSIES

Het nabootsen van waterstromingen in gesloten en open leidingen met behulp van een luchtdoorstroomd model is in het algemeen goed mogelijk mits aan de volgende punten wordt voldaan :

- De stroming dient stationair te zijn, tijdsafhankelijke processen kunnen niet worden nagebootst.
- De stroming in het prototype dient plaats te vinden langs hydraulisch ruwe wanden met een grote ruwheid, bij een stroming langs gladdere wanden is voorzichtigheid geboden bij de simulatie.
- De nabootsing van open kanalen en rivieren is beperkt tot niet te smalle kanalen.

Tot de grote voordelen van een luchtdoorstroomd model kunnen gerekend worden de grote meetnauwkeurigheid en het gebruik van kleine, eenvoudig te vervaardigen modellen.

5	LITER	ATUUR	
	[1]	J.A. Bau e.a.	Fundamentals of aerodynamic models for the study of river problems - Int. Ass. for Hydraulic Research, 1972 (?)
	[2]	W.H. Snijder	Similarity criteria for the application of fluid models to the study of air pollution meteorology - Bound. Layer Met. 3, 113, 1972.
	[3]	V.L. Streeter	Fluid Mechanics - Sixth Edition, Mc. Graw Hill 1975, pag. 297
	[4]	G. Buresti	The effect of surface roughness on the flow regime around circular cylinders. 4th Col. on Ind.Aerodynamics, Aachen, part 2, 13, June 1980
	[5]	F.H. Chaudhry & J.E. Cermak	Windtunnel modeling of flow and diffusion over an urban complex. Colorado State Univ. Rep. CER 70-71 FHC- IEC 24 May 1971.
	[6]	Chow	Open Channel Hydraulics Mc. Graw Hill, 1959.
	[7]	A.K.M.F. Hussain & W.C. Reynolds	Measurements in fully developed turbulent channel flow - J. of Fluids.Eng. 569 Dec. 1975
	[8]	H. Schlichting	Boundary-Layer Theory Mc. Graw Hill 1968 pag. 577
	[9]	N. Rajaratnam & D. Muralidhar	Boundary shear stress distribution in rec- tangular open channels. La Houille Blanche 6, 603, 1969.

0,1 AMINAIRE TURBULENTE STROMING DOOR RUWE BUIZEN; 0,09 STROMINGGERIF GANGS KWARDRATISCHE WEERSTANDSWET. GEBIED 0,08 Het -++++++ FFFF**111**0,05 П 0,07 0,04 Moody 0,06 LAMINAIRE SI 0,03 0,05 0,02 -----0,015 diagram 0,04 0,01 0,00**8** RO f 0,006 RUWHEID 0,03 0,004 0,025 Re D. krit. 0,002 $+ \Pi$ RELATIEVE 0,02 0,001 0,0008 0,0006 TT H +++0,0004 GLADDE 0,015 Ш 0,0002 BUISWANDEN 0,0001 0,000.05 0,01 П 0,009 2(10) 3 4 5 6 8 104 0,008 8 107 MT_TN 3599_ Fig. 1 2(104) 3 4 5 6 8 105 2(10) 3 4 5 6 8 106 103 2(104) 3 4 5 6 $Re_{D} = \frac{VD}{V}$ TNO .002

ΔP.instell inulatie gebied	ng
Simulatie van het vrije oppervlak met boven. plaat	MT_TNO 3599_002 Fig. 2



