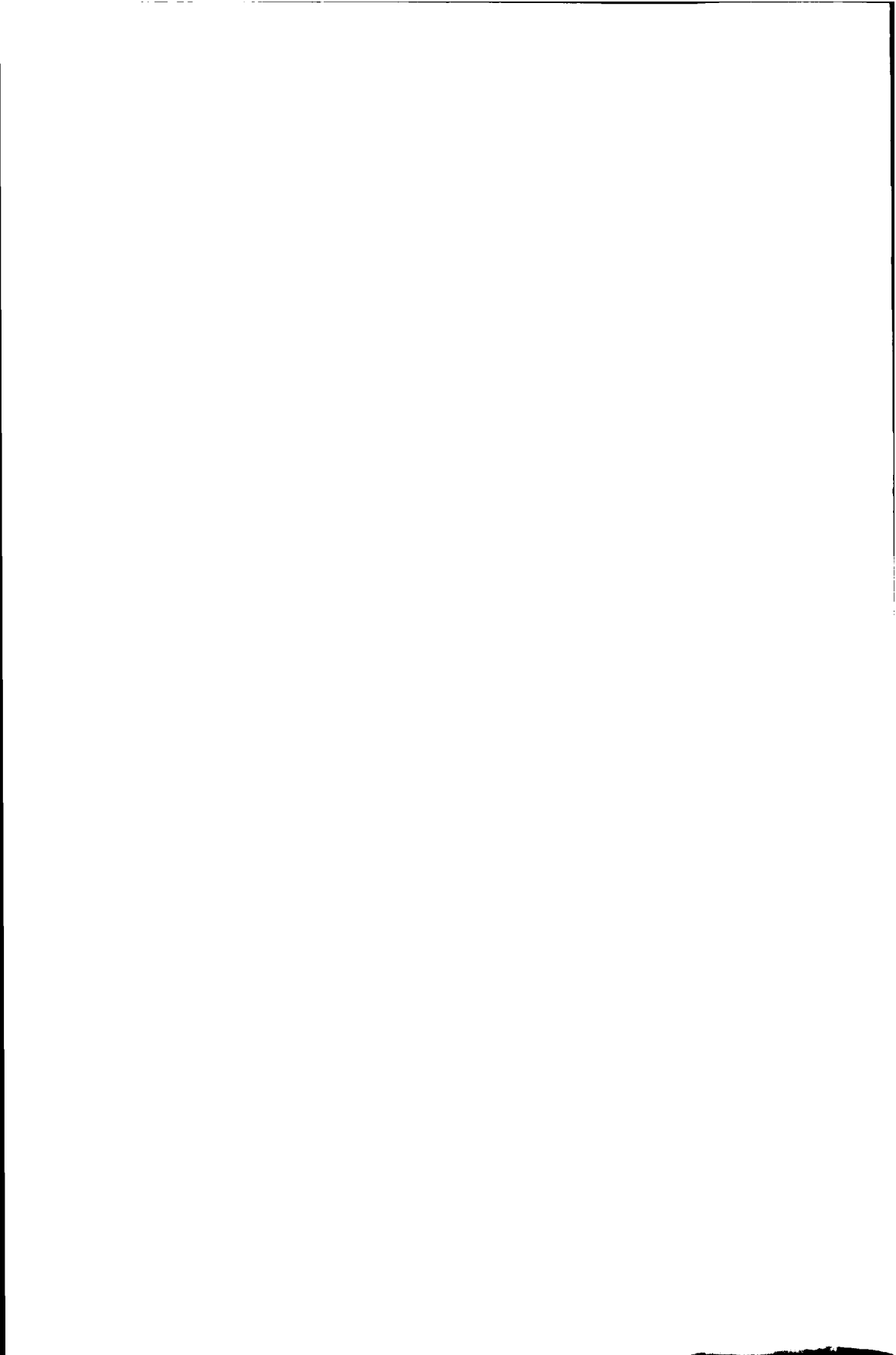


STELLINGEN

Behorend bij het proefschrift "Modellering van dynamische processen voor drinkwaterdistributie" door J.Cohen.

1. Uit het oogpunt van drinkwaterkwaliteit verdienen het transport- en het distributieproces minstens evenveel aandacht als de winning en de zuivering van het water.
2. Een kwalitatief en kwantitatief betrouwbare en betaalbare drinkwatervoorziening vormt de hoeksteen van de volksgezondheid.
3. Indien als bron voor het geleverde drinkwater oppervlaktewater wordt gebruikt, is er geen directe noodzaak om uit een oogpunt van waterschaarste water te besparen.
4. Een gemeentelijk nutsbedrijf biedt geen garantie voor de laagste prijs aan de consument voor het geleverde product.
5. Het beslissen op grond van alleen kosten-baten analyses heeft reeds diverse malen geleid tot verkeerde beslissingen. Beslissen op basis van de uitkomsten van een kosteneffectiviteitsanalyse kan tot betere resultaten leiden.
6. De presentatie van een milieubeleid moet zo breed mogelijk en reëel zijn, in geen geval te dramatisch.
7. De verwachtingen van de bewoners van een gebouw voorzien van een klimaatregelingsinstallatie zijn doorgaans hoger dan gerealiseerd kunnen worden.
8. De eindigheid in het denken van de mens is van grote invloed op ons consumptiegedrag en daarmee op de inrichting van de aarde.
9. De bestrijding van de verpaupering in Amsterdam moet met alle mogelijke middelen worden aangepakt. Het is niet zozeer een kwestie van fysieke inspanning, alswel van verbetering van de mentaliteit en van het normbesef van de burger.
10. Zolang er nog groente in gebotteld bronwater wordt gekookt, dient de voorlichting (vanaf de bron) verbeterd te worden.

(Peter Zwaanswijk en Margreet Ton)



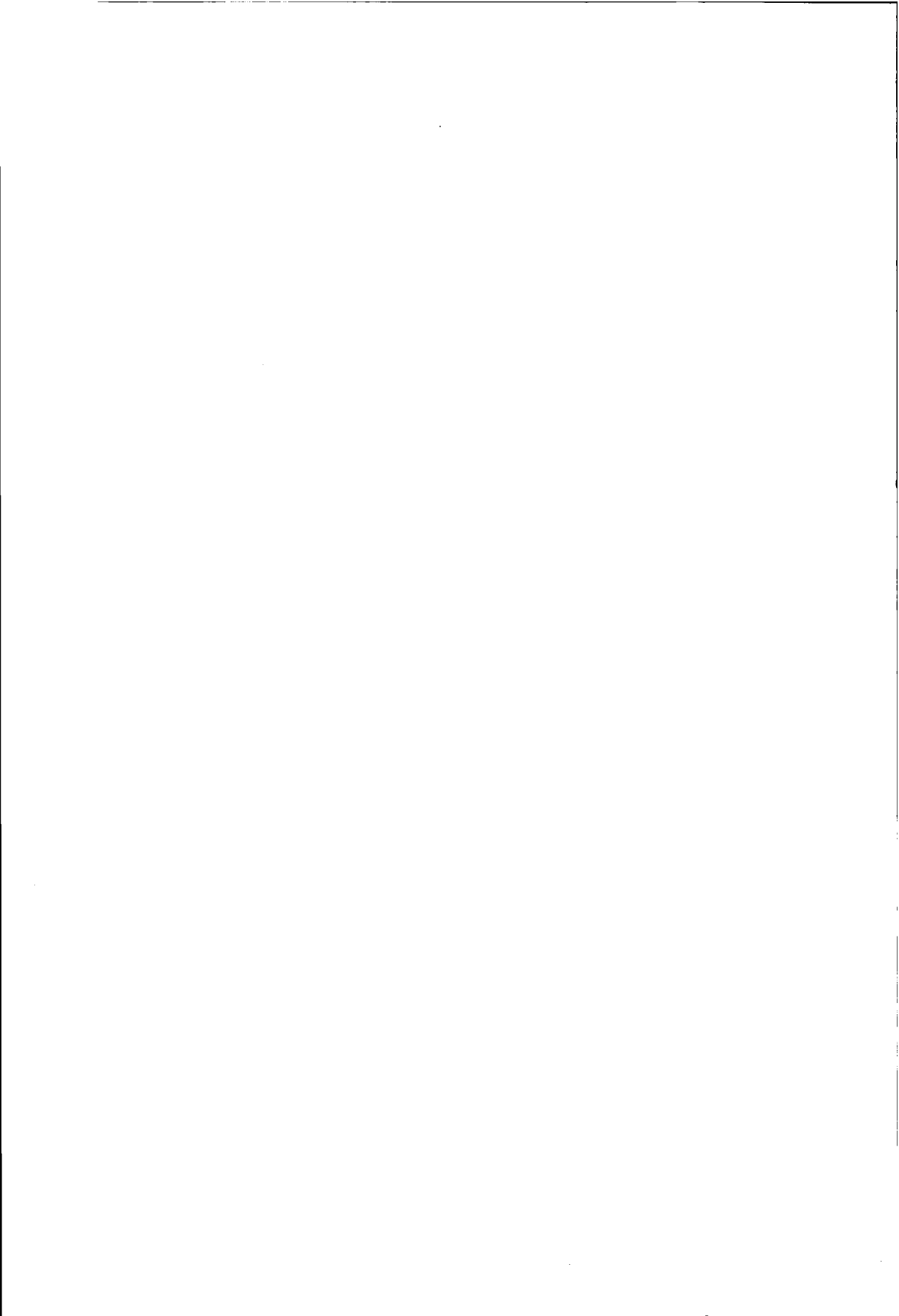
C10030

10-05-17

10-05-18

**TR diss
1885**

**MODELLERING VAN
DYNAMISCHE PROCESSEN
VOOR
DRINKWATERDISTRIBUTIE**



**MODELLERING VAN
DYNAMISCHE PROCESSEN
VOOR
DRINKWATERDISTRIBUTIE**

De ontwikkeling van een reken- en simulatiemodel voor dynamische processen bij transport en distributie van drinkwater getoetst aan de Amsterdamse situatie.



PROEFSCHRIFT

ter verkrijging van de graad van doctor aan de Technische Universiteit Delft, op gezag van de Rector Magnificus, Prof. drs. P.A.Schenck, in het openbaar te verdedigen ten overstaan van een commissie door het College van Dekanen daartoe aangewezen, op dinsdag 8 januari 1991 te 14.00 uur

door

JOHAN COHEN

werktuigbouwkundig ingenieur
geboren te Amsterdam

Dit proefschrift is goedgekeurd door de promotor
Prof. ir. J.H. Kop

Promovendus realiseerde dit proefschrift in zijn functie van hoofd van de sector Ontwikkeling van de afdeling Distributie Gemeentewaterleidingen Amsterdam.

ISBN 90-6275-641-7 CIP

Copyright © 1991 by Gemeentewaterleidingen Amsterdam



All rights reserved.

No part of the material protected by this copyright notice may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronical or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage and retrieval system, without written permission from the publisher: Delft University Press, Stevinweg 1, 2628 CN Delft, The Netherlands

Aan mijn ouders

Aan Anny

Aan Johan

Aan Luciënne



een duintop schittert in het licht
een poel met stilstaand water
deft zorgeloos de zorg voor later
rivieren kersen blinkend zwaar gewicht

natuur strijdt een beslecht gevecht
de mens is trots op wat hij heeft volbracht
nu hij verbijsd slechts het einde wacht

„hoe nam hij ooit daartoe het recht”

Margreet Ton



INHOUDSOPGAVE

Blz.

DANKWOORD

VOORWOORD

SAMENVATTING 1

SYNOPSIS 5

Hoofdstuk I INLEIDING 9

I.1 Kwaliteit van drinkwater 9

I.2 Kwaliteit en distributie 12

I.3 Het ontwerpen van leidingnetten 19

I.4 Literatuuronderzoek 20

I.5 Verschillen tussen statische en dynamische reken-
modellen 24

I.6 Toepassingsmogelijkheden van een dynamisch reken-
model 25

I.7 Plaats van het rekenmodel in het licht van de
kwaliteitsbewaking 29

I.8 Pakket van eisen voor het dynamisch rekenmodel 32

Hoofdstuk II THEORIE 35

II.1 Algemeen 35

II.2 De modelvergelijkingen 37

II.2.1 De elementsvergelijkingen 38

II.2.2 De configuratievergelijkingen 48

II.2.3 De toestandsvergelijkingen 51

II.3 Illustratie op een testnet 53

II.4 Matrices, transformaties en continuïteit 56

II.4.1 De structuur van de matrices 56

II.4.2 De transformatie van matrices 57

II.4.3 Het gebruik van splines 61

II.5 De oplossing van het stelsel vergelijkingen 65

II.5.1 De bepaling van de toestandsvector 65

II.5.2 De beginvoorwaarden 76

II.5.3 De drukk bepaling 78

II.5.4 De afnamevector 80

II.6	Dimensieverkleining	85
	II.6.1 De aggregatie bij het schematiseren	87
	II.6.2 De opdeling in subsystemen	92
II.7	Identificeerbaarheid	96
	II.7.1 De praktische identificatie	100
II.8	Bepaling reistijden en trajecten	101
	II.8.1 De verblijftijdsbepaling	102
	II.8.2 Het kwaliteitsverloop en de herkomst van het water	113
Hoofdstuk III	<u>BESCHRIJVING VAN HET COMPUTERPROGRAMMA</u>	117
III.1	Algemeen	117
III.2	De opbouw van het programma DYNASIM	119
	III.2.1 Het programma DYNA	120
	III.2.2 Het programma QUALI	121
	III.2.3 Het programma SCHAT	122
	III.2.4 Het programma GRAPH	123
III.3	De relaties binnen de deelprogramma's	124
	III.3.1 De relaties binnen DYNA	124
	III.3.2 De relaties binnen QUALI	127
	III.3.3 De relaties binnen SCHAT	130
	III.3.4 De relaties binnen GRAPH	132
III.4	In- en uitvoerstructuur van de deelprogramma's	133
	III.4.1 In- en uitvoerstructuur van DYNA	134
	III.4.2 In- en uitvoerstructuur van QUALI	139
	III.4.3 In- en uitvoerstructuur van SCHAT	146
	III.4.4 In- en uitvoerstructuur van GRAPH	148
Hoofdstuk IV	<u>BEREKENINGEN OP TEST- EN PRAKTIJKNETTEN</u>	149
IV.1	Uitvoering	150
IV.2	Berekeningen op testnetten	154
IV.3	Berekeningen op praktijknetten	163
Hoofdstuk V	<u>CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN</u>	167
Hoofdstuk VI	<u>SLOTBESCHOUWING</u>	173

LITERATUUR

177

BIJLAGEN

BIJLAGE 1 AFKORTINGEN 183

1. Algemeen
2. Parameters waterkwaliteit
3. Schematisch overzicht van enkele uit de literatuur bekende programma's

BIJLAGE 2 SYMBOLEN 187

BIJLAGE 3 DEFINITIES EN BEGRIPPEN 191

BIJLAGE 4 FIGUREN 201

De figuren 1 t/m 20 behorende bij het testen en toetsen (Hoofdstuk IV)

CURRICULUM VITAE 223

DANKWOORD

Bij de voltooiing van dit proefschrift besef ik hoevelen hieraan hebben bijgedragen. Hierbij spreek ik dan ook mijn grote dank uit aan allen die op enigerlei wijze aan de tot standkoming hebben meegewerkt.

In het bijzonder dank ik mijn promotor prof. ir. J.H. Kop voor zijn positieve en kritische instelling ten aanzien van het uitgevoerde onderzoek en zijn vertrouwen dat dit tot een promotie zou leiden.

Ook wil ik de heer ir. M.K.H. Gast, directeur Gemeentewaterleidingen, noemen. Hij bood mij de mogelijkheid om het onderzoek tot een proefschrift uit te werken.

Mijn dank gaat tevens uit naar collega medewerkers van de sector Ontwikkeling van Gemeentewaterleidingen die op zeer enthousiaste wijze aan het onderzoek hebben deelgenomen. Met name zijn dit René Burgers, Kees van der Drift, Jan van Geel, Jan Scholte en Piet de Visser.

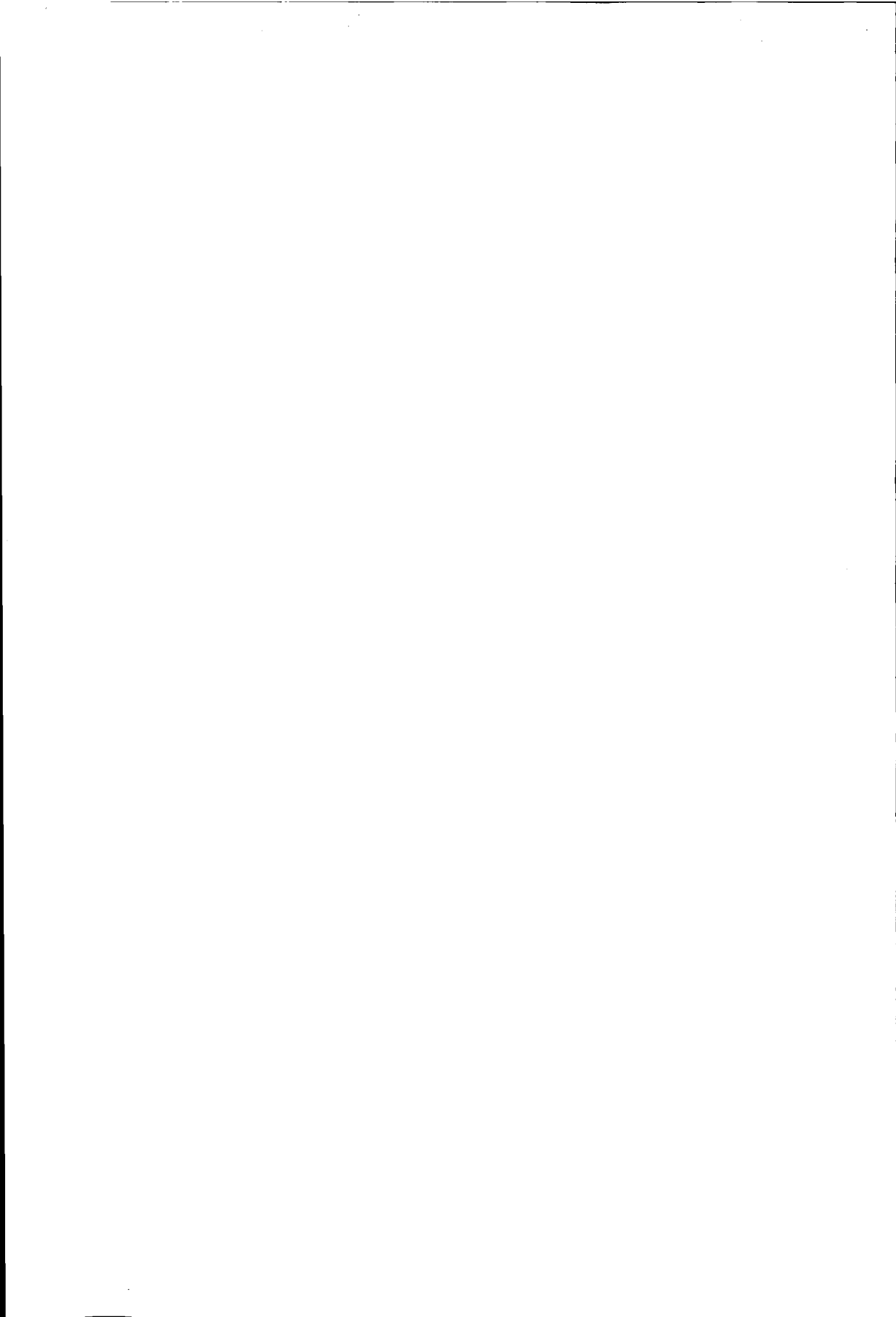
Verder bedank ik de inmiddels afgestudeerde studenten Eric de Beer, Bas van Doorn, Marcel de Groot, Mario van Essen, Henk Groot-Roesink en Han Wensink voor hun deelonderzoeken.

Ook Jan Schut van de Universiteit Twente wil ik hierbij noemen voor zijn stuwende rol bij de begeleiding.

Naar de eindeloos geduldige Sonita Ghazi-Bhikhie gaat mijn dank uit voor het vele typewerk, naar Jurek Gorniewicz voor het uitwerken van vele afbeeldingen en naar Margreet Ton en Els van Geel voor de redactionele hulp.

Mijn ouders dank ik voor het indertijd in mij gestelde vertrouwen, de bereidheid en de stimulans mij te laten studeren.

Anny, jouw enthousiaste belangstelling was voor mij een grote steun.



VOORWOORD

Hoewel bij diverse ingenieursbureaus leidingnetberekeningen met behulp van computers reeds in de beginjaren zestig in beperkte mate hun intrede deden, is het voor de bedrijfstak nog niet zo lang geleden dat deze berekeningen handmatig werden uitgevoerd. De ontwikkeling en het gebruik van computermodellen in de bedrijfstak ter oplossing van distributievraagstukken staan dan ook nog in de kinderschoenen en zijn zodoende ook thans nog niet algemeen ingeburgerd.

Het begin van de jaren tachtig kan voor de bedrijfstak gekarakteriseerd worden als een "aftastende" periode ten aanzien van het computergebruik voor de oplossing van transport- en distributievraagstukken (lit. 1).

We bevinden ons nu een fase verder, namelijk in de "erkenning-fase". Het kostte in het verleden veel tijd en inspanning om handmatig berekeningen uit te voeren. De nauwkeurigheid en het inzicht in het totale stromingsbeeld, met name kwantitatieve en kwalitatieve aspecten daarvan, bleven daardoor zeer beperkt. We hebben inmiddels ervaren dat rekenprogramma's en de hiervoor benodigde computers nuttig zijn. Dit geldt vooral wanneer het gaat om sterk vermaasde- en vertakte netwerken, die drinkwaternetten in de regel zijn.

Een volgende fase, de "optimalisatiefase" voor kwantiteits- en kwaliteitsbeheersing van drinkwater, zal in de nabije toekomst haar intrede doen. Deze fase zal worden gekenmerkt door een groeiende behoefte aan geavanceerde rekenmogelijkheden, waarmee meer inzicht wordt verkregen in het totaalbeeld van de distributie. Hiermee kunnen alternatieven in ontwerp en bedrijfsvoering op hun waarde worden beoordeeld.

Naast kennis, ervaring in het distributiebeheer en een goede inzet van reken- c.q. simulatiemodellen zal het mogelijk worden een hoge score te bereiken ten aanzien van de optimalisatiegraad.

In deze fase zullen mogelijkheden worden geboden om investeringen van grote infrastructurele werken, zoals die bij de drinkwatervoorziening bestaan, vooraf te toetsen aan hun bruikbaarheid en ze zonodig te verbeteren.

Bij Gemeentewaterleidingen Amsterdam werd - mede naar aanleiding van mijn directe betrokkenheid als sectorhoofd Ontwikkeling bij de afdeling Distributie - bij in de praktijk uitgevoerd kwaliteitsonderzoek een sterke behoefte gevoeld aan een geschikt, geautomatiseerd rekenmodel ten behoeve van het voorspellen, beschrijven en verklaren van dynamische processen (lit. 2).

In dit licht bezien is de ontwikkeling en de toepassing van het onderhavig rekenmodel voor de optredende "dynamische" processen bij het transport en de distributie van drinkwater te noemen.

Deze dynamische processen zijn:

- de drukverlopen in het net op specifieke punten;
- de stromingen door de buizen;
- de stromingstrajecten door het net;
- de reis- en verblijftijden van waterdeeltjes tijdens de netpassage;
- de verandering in de samenstelling van het afgenomen water in een afnamepunt bij toepassing van verschillende watersoorten;
- de verandering van een kwaliteitsparameter over een doorlopen stromingstraject.

De ontwikkeling van dit rekenmodel werd door mij in 1983 ter hand genomen nadat uit literatuurstudie bleek dat dergelijke modellen niet voorhanden waren.

Het rekenmodel kwam mede tot stand door de inzet van studenten van hogescholen en universiteiten (Hogere Technische School Amsterdam, Universiteit Twente en Technische Universiteit Delft), die in het kader van stages en afstudeeropdrachten delen van het geheel uitvoerden (lit. 10, 11, 17, 19, 22 en 23). Voortgang en bijstelling van de ontwikkelingen vonden plaats door middel van rapportages, zowel intern bij GW als extern, publicaties in de bladen H₂O en AQUA (lit.26, 27, 28 en 29) en door middel van voordrachten en gastcolleges binnen de vakgroep Gezondheidstechniek en Waterbeheersing van de faculteit der Civiele Techniek van de Technische Universiteit Delft.

De praktische uitvoering van de ontwikkeling werd ingepast in overige onderzoekswerkzaamheden van de sector Ontwikkeling van GW. Dit betekende niet alleen een sterke inbreng van de medewerkers van het waterleidingbedrijf, maar ook een sterke wisselwerking van kennis en ervaring. Onderzoekresultaten werden direct op geldigheid en praktische waarde getoetst.

De benadering is aanvankelijk zo abstract mogelijk geweest om de toepasbaarheid van het rekenmodel universeel te doen zijn.

De indeling van het proefschrift is als volgt :

In hoofdstuk I is aandacht besteed aan de kwaliteit van drinkwater en in het bijzonder de beheersing van de kwaliteit tijdens de distributie. Op basis van de stromingsleer en met toegepaste wiskunde, is de programmatuur ontwikkeld en vervolgens geïmplementeerd op computers (de hoofdstukken II en III). Een uitgebreide test- en toetsfase met diverse hypothetische test- respectievelijk praktijknetten volgde, waarbij de aandacht gericht was op de werking, functionaliteit en de voorspellingswaarde van het rekenmodel (hoofdstuk IV). De abstracte benadering wordt door conclusies en aanbevelingen afgesloten (hoofdstuk V) en voorzien van een slotbeschouwing in hoofdstuk VI.

Ten behoeve van GW is het rekenmodel reeds toegepast, zowel op enkele probleemgebieden in de bestaande situatie als bij stadsuitbreidingen. Dit is beschreven in het rapport "Diverse toepassingen van het dynamisch rekenmodel DYNASIM" (lit. 25) dat een belangrijk deel uitmaakt van de totale studie.



SAMENVATTING

Het proefschrift geeft de ontwikkeling van een zogenaamd "dynamisch" rekenmodel voor de beschrijving van de dynamische processen tijdens transport en distributie van drinkwater. Het inzicht in deze complexe processen wordt hiermee aanzienlijk vergroot, zodat toepassing hiervan belangrijke bijdragen geeft inzake de besluitvorming bij grote investeringen van infrastructurele werken, bij de bedrijfsvoering en bij het kwaliteitsonderzoek van drinkwater.

Dit dynamisch rekenmodel is ontwikkeld omdat een dergelijk rekenmodel niet bestond en omdat de bestaande, zogenaamde "statische" rekenmodellen de dynamische processen slechts benaderen en omdat lang niet alle processen die van invloed zijn op de waterkwaliteit, daarmee berekend kunnen worden.

Uitgaande van een door de auteur opgesteld pakket van eisen waaraan een dynamisch rekenmodel voor universele toepassing moet voldoen, heeft de ontwikkeling langs abstracte weg plaatsgevonden. Vervolgens is na een algemene inleiding, waarin de drinkwaterkwaliteit c.q. de beheersing hiervan tijdens de distributie centraal staat, de plaats van het rekenmodel aangegeven in samenhang met de kwaliteitscontrole en overige metingen aan het net. Oorzaken worden genoemd van enkele problemen die onder andere voortkomen uit de aanvoer van verschillende watersoorten. Voor zowel bestaande als nieuwe situaties worden verbeteringen c.q. alternatieven aangereikt bij de inrichting en de bewaking van het distributieproces.

Belangrijk is dat het model ingezet kan worden op alle hiërarchische niveaus die in een willekeurig distributienet onderscheiden kunnen worden. Ieder niveau wordt gekenmerkt door zijn inherente problematiek en eigenschappen zoals een sterke vermazing, overdimensionering, zeer kleine drukverschillen en de zeer lage snelheden. Belangrijk is daarom dat zowel invoer- als rekenstapgrootte zeer flexibel gekozen moet kunnen worden. Dit vereist een zodanig theoretische opzet dat de tijdsafhankelijke beschrijvende vergelijkingen continu zijn. Afleidingen en uiteenzettingen van deze vergelijkingen worden in een afzonderlijk theoretisch

gedeelte behandeld, evenals de oplossing hiervan. De uitwerking van de theorie is zodanig dat alle mogelijke energieomzettingen, inclusief drukverliestermen die zouden kunnen voorkomen, worden meegenomen.

De theorie resulteert in onder andere een "eerste orde" differentiaalvergelijking in impliciete vorm als gevolg van een singuliere matrix, waarin bovendien een kwadratische term voorkomt.

Bij de oplossing speelt de volgorde van de berekeningsstappen een belangrijke rol. Allereerst worden de onbekende stromingen in de buizen bepaald, waarmee vervolgens de drukken in de knopen worden berekend. Deze volgorde is vereist om tot een nauwkeurige oplossing te komen. Een andere volgorde zou tot onnauwkeurige berekeningsresultaten leiden, doordat de heersende drukverschillen in vermaasde netten te klein zijn.

Op basis van de berekende drukken en stromingen wordt vervolgens een theoretische behandeling gegeven voor de overige dynamische processen zoals reis- en verblijftijden van het water in het net, de stromingstrajecten, de mogelijke parameterveranderingen van het water bij de passage van de verschillende leidingmaterialen en veranderingen van de herkomst van het water indien verschillende instromen aanwezig zijn.

In een afzonderlijk deel wordt deze theorie vertaald in het computerprogramma **DYNASIM**. De opbouw van dit programma is geheel modulair. De relaties tussen de verschillende deelprogramma's worden behandeld, waarbij apart wordt ingegaan op de in- en uitvoerstructuur van de deelprogramma's. Een en ander wordt geïllustreerd met voorbeelden van de uitvoer.

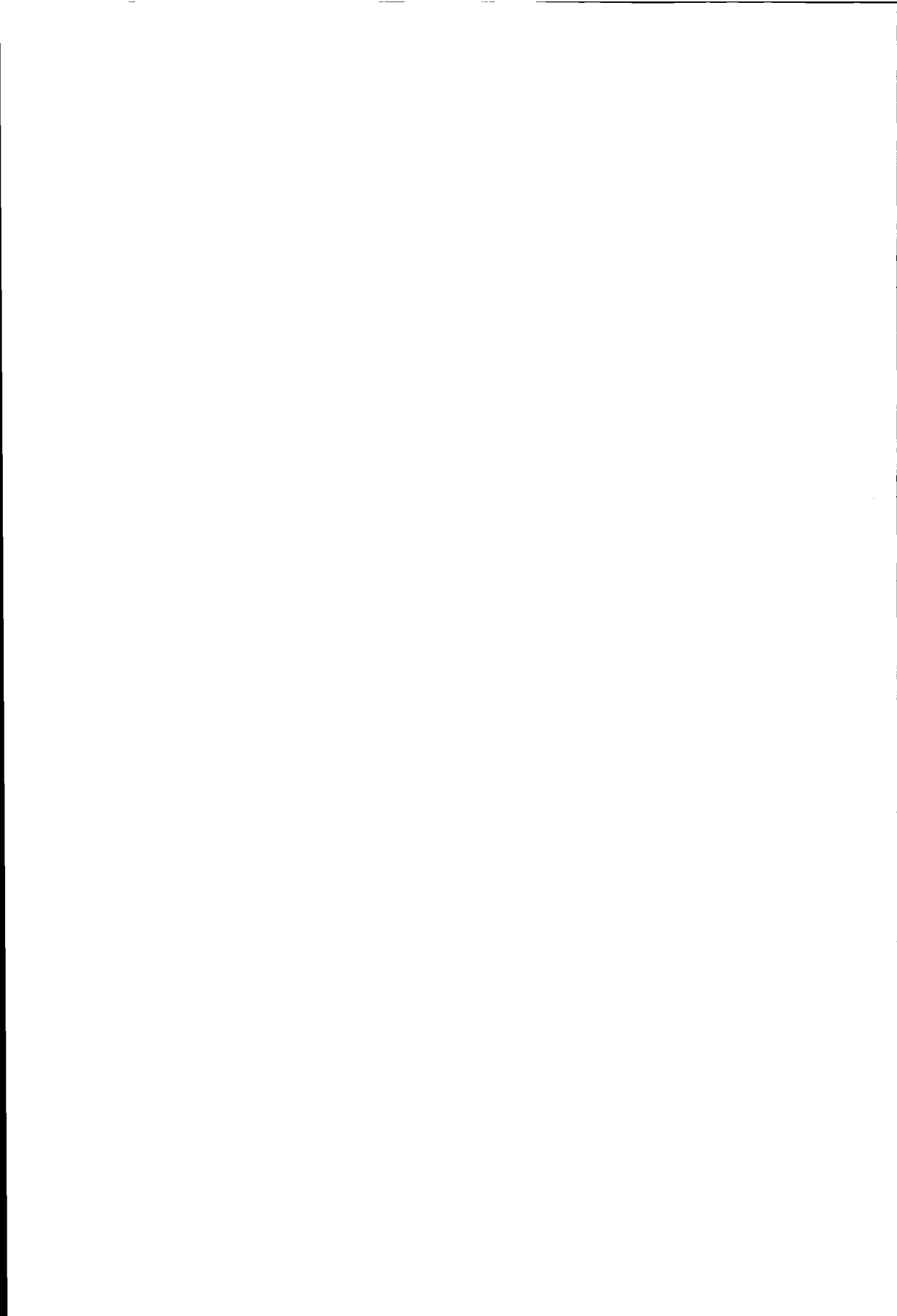
Aan de hand van hypothetische- en praktijknetten is uitvoerig ingegaan op het testen van de functionaliteit van de programmatuur en de gevoeligheid van parameterwaarden.

Uit dit geheel worden conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan.

Het proefschrift wordt afgesloten met een algemeen concluderende slotbeschouwing waarin aanbevelingen voor verdere ontwikkeling en gebruik van het dynamisch rekenmodel zijn aangegeven. Uit praktische overwegingen zijn in een afzonderlijk rapport de toetsing en de toepassingen van het rekenmodel opgenomen.

Het toetsen van het rekenmodel is uitgevoerd op enkele representatieve leidingnetten in en rond Amsterdam. Deze toetsing bestond uit ijkingen en herhalingsberekeningen bij andere leveringscondities en is op alle hiërarchische niveaus verricht. Vergelijkingen zijn hierbij gemaakt tussen gemeten en berekende waarden van de druk, snelheid, verblijftijden, Cl, EGV en troebeling van het drinkwater. Voor achtergrondinformatie is een afzonderlijke beschrijving opgenomen van de huidige Amsterdamse situatie van de distributie.

Toepassingsmogelijkheden van DYNASIM zijn op een breed terrein behandeld, waarbij voorbeelden zijn beschreven van toepassingen die reeds zijn uitgevoerd in de Amsterdamse situatie en mogelijk toekomstige oplossingen zijn aangegeven voor verbeteringen in de netconfiguratie en de bedrijfsvoering.



MODELLING THE DYNAMIC PROCESSES OF DRINKING
WATER DISTRIBUTION

SYNOPSIS

This dissertation discusses the development of a "dynamic" calculation model for describing the dynamic processes associated with the transport and distribution of drinking water. This model adds substantially to the understanding of these complex processes and its application contributes significantly to the decision making pertinent to large investments in infrastructure in terms of both business management and quality control.

This calculation tool has been developed to fill the need for a dynamic model and to offset the disadvantages of current "static" calculation models which largely overlook dynamic processes and are far from capable in calculating of all processes affecting water quality.

The development of this model is based on a theoretical package of requirements drawn up by the author aimed at making it suitable for universal application. After a general introduction which focusses on drinking water quality and its management during distribution, the use of the calculation model in connection with water quality control and other network measurements is discussed. The causes of a number of problems are raised, including those resulting from the supply of varying types of water. Improvements and alternatives are proposed for arranging and monitoring the distribution process in existing as well as in new situations.

It is essential that the model can be applied to every hierarchical level which can be distinguished in a given distribution network. Each level is characterised by its own inherent problems and properties, including strong meshing, over-dimensioning, minimal pressure differentials and extremely low velocity. A key-element in this respect is the capacity of the program to select both the input and calculation steps with a maximum of flexibility. This requires a theoretical structure in which time-related descriptive equations are continuous.

A separate theoretical section is devoted to the derivation and explanation of these equations, as well as to their solutions. The theory is elaborated to accommodate all possible conversions of energy, including every pressure loss term that can possibly arise.

The theory leads to a "first order" differential equation in implicit form, the result of a singular matrix which moreover, contains a quadratic term. The sequence of the calculation steps plays an important role in the solution. The unknown flows in the pipes are determined first, and these data make possible the subsequent calculation of node pressures. The sequence "flow-pressure" instead of "pressure-flow" is vital for arriving at an accurate solution, as the pressure differences in strongly meshed networks are minimal. A reverse sequence would lead to inaccurate results.

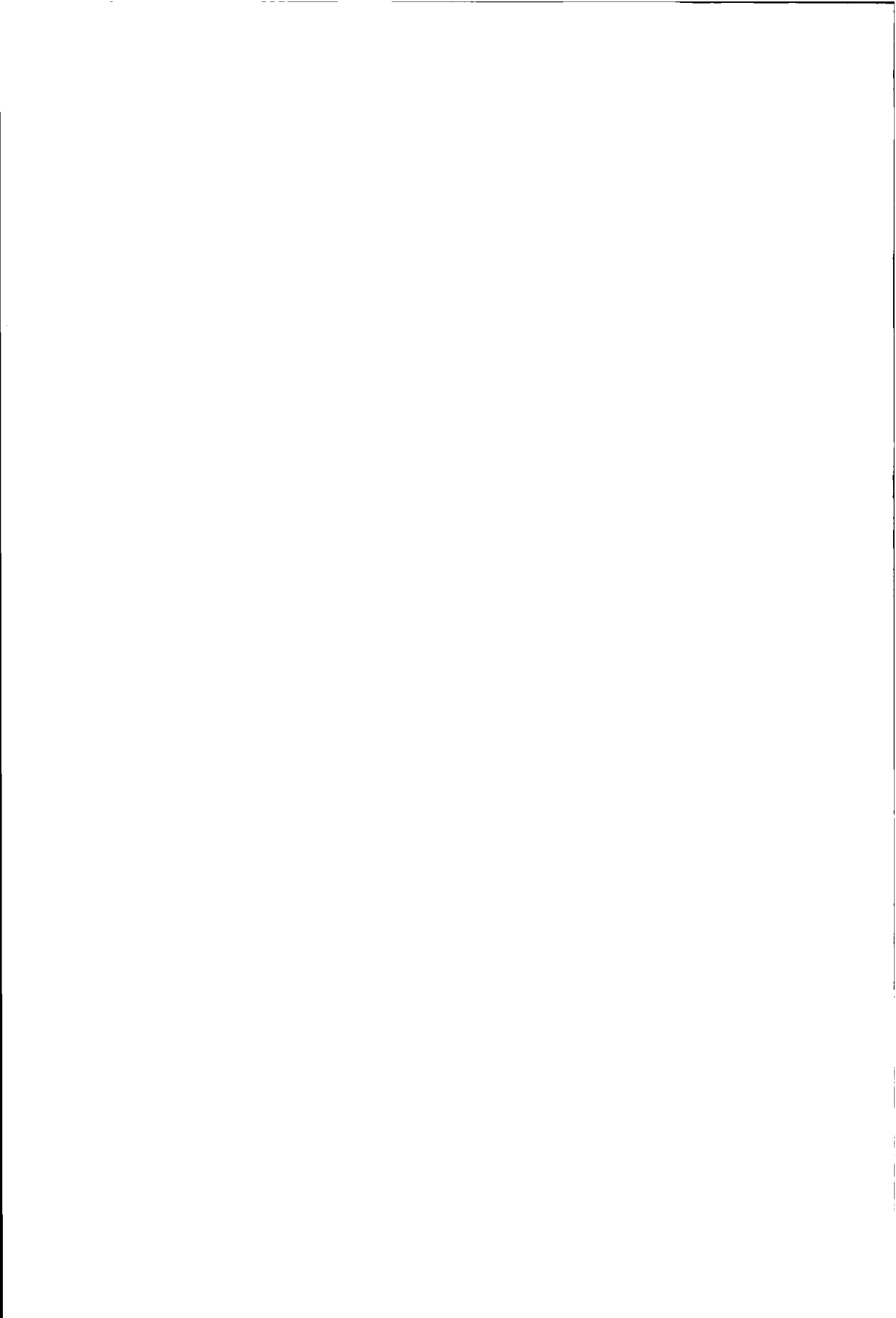
On the basis of the calculated flows and pressures, the remaining dynamic processes are theoretically treated, including travelling and retention times of water in the network, flow routing, possible changes of the composition of the water as it flows through pipes made of various materials, and changes in the origin of water in the case of varying supplies.

A separate section translates this theory into the DYNASIM computer program. The organisation of this software is entirely modular. Relationships between various sub-programs and input and output structure of the sub-programs are described. These points are illustrated with examples of output.

The program's functionality and validity have been tested by uses of hypothetical networks and by testing programs on existing networks. For practical reasons, the testing in the field has been described in a separate report (lit.25). The model was checked on several representative pipe networks in and around Amsterdam. Testing consisted of calibration and repetitive calculation under different operating conditions. It was carried out on all the differing hierarchical levels. Comparisons were then made between

the measured and calculated values of the pressure, velocity, Cl, EGV and turbidity of drinking water. There is also a wide range of DYNASIM applications discussed in lit.25.

The dissertation concludes with a number of general observations, and general recommendations for further development and use of the dynamic calculation model.



Bij het ontwerpen van distributiemiddelen, bij de bedrijfsvoering en kwaliteitsbeheersing tijdens de distributie staat de drinkwaterkwaliteit centraal. Het uiteindelijke doel is drinkwater aan de consument te leveren van een zo hoog mogelijke kwaliteit. Dit betekent voor een goede uitvoering van het distributieproces, dat de juiste middelen aanwezig moeten zijn en dat de beheersing van de stromingen door het net zodanig is, dat een zo gering mogelijke kwaliteitsvermindering na het zuiveringsproces optreedt.

Voor een goed begrip is het daarom zinvol allereerst af te spreken wat we onder kwaliteit verstaan en hoe de kwaliteit tijdens de distributie te beïnvloeden is. Daarbij zal worden ingegaan op de effecten van verscheidene soorten water, afkomstig van verschillende bronnen en de bijzondere kwaliteitseffecten die in een net kunnen optreden. Hiervan uitgaande worden ontwerpeisen en maatregelen genoemd.

In dit hoofdstuk wordt vervolgens aandacht geschonken aan bevindingen uit een literatuuronderzoek. Bovendien wordt ingegaan op de essentiële verschillen tussen de twee mogelijke rekenmethoden, de bestaande "statische" rekenmodellen en het in deze studie nieuw ontwikkelde "dynamisch waterbewegingsmodel", ookwel "dynamisch rekenmodel" genoemd. Speciaal zijn de plaats en de toepassingsmogelijkheden van het ontwikkelde rekenmodel aangegeven in wisselwerking met de waterkwaliteitsbewaking.

Dit inleidende hoofdstuk wordt afgesloten met het pakket van eisen waaraan het rekenmodel moet voldoen.

I.1 KWALITEIT VAN DRINKWATER

Het begrip kwaliteit is moeilijk vast te leggen. Voor de kwaliteit van drinkwater is dit eveneens het geval. Het aantal in de literatuur gebruikte definities voor kwaliteit is groot.

Vaak wordt kwaliteit geassocieerd met termen als lange levensduur, gering onderhoud, nauwkeurige dimensies, grote sterkte, zuiverheid, enzovoort. Bij het produkt drinkwater zoals dat geleverd

wordt door het waterleidingbedrijf, komen we niet goed uit met dergelijke omschrijvingen. Niet alleen omdat deze benadering nogal éézijdig bekeken is vanuit de kant van de leverancier, maar ook omdat het aantal parameters dat bij drinkwater de kwaliteit bepaalt, (zeer) groot is. Het is niet zonder reden dat de drinkwatervoorziening en de controle op de kwaliteit geregeld zijn bij wet, namelijk het "Waterleidingbesluit" en de "VEWIN aanbevelingen". De controle op de geleverde kwaliteit is in het algemeen een (in)directe overheidstaak. Juist in dit feit zit het belang van de consument verscholen, met name zijn verwachtingen van het produkt. Naar mijn mening is de onderstaande definitie van kwaliteit toepasbaar op het produkt drinkwater:

"Kwaliteit is het geheel van produkt-eigenschappen in relatie tot de behoeften en verwachtingen zoals die gesteld worden door de gebruiker".

Over de directe behoeften kunnen we kort zijn: het op ieder tijdstip leveren van de gewenste hoeveelheid onder voldoende druk. De verwachtingen van de consument ten aanzien van het geleverde produkt zullen echter ruimer zijn, te weten:

- bacteriologische en chemische betrouwbaarheid;
- helder en vrij van kleur, smaak en geur;
- levering tegen maatschappelijk aanvaardde prijs;
- maatschappelijk verantwoord milieubeleid (waaronder minimalisatie van het energieverbruik tijdens de distributiefase).

Dit is een nogal complex geheel, dat bovendien extra bemoeilijkt kan worden indien er sprake is van verschillende watersoorten die elkaar ongunstig kunnen beïnvloeden. Dit is een veel voorkomende situatie, ook in Amsterdam, waar twee verschillende watersoorten worden gewonnen, gezuiverd en gedistribueerd, namelijk het Rivier-Duinwater en het Rivier-Plassenwater (RD- respectievelijk RP-water, voor gebruikte afkortingen zie bijlage 1). In lit. 25, dat de toepassingen van DYNASIM beschrijft, wordt hier nader op ingegaan.

De vraag kan gesteld worden hoe een waterleidingbedrijf garant kan staan voor de levering van water van de vereiste kwaliteit.

Voor die garantie is de basis gelegd in het "Waterleidingbesluit" waarin de minimumkwaliteit van drinkwater is genormeerd. Aanvullend hierop zijn de "VEWIN Aanbevelingen", de "Europese Richtlijnen" en in de nabije toekomst de "Wet op de Produkt-Aansprakelijkheid".

Dit alles blijkt voor de kwaliteitsbeheersing nog niet voldoende. Niet alleen door het feit dat de laboratoria niet in staat zijn alle (complexe) stoffen te detecteren en de schadelijkheid hiervan vast te stellen, maar vooral doordat de samenstelling van het water tijdens het transport en de distributie achteruit gaat zonder dat hierop enige invloed is uit te oefenen. Er is dus behoefte aan een methode die de inrichting van de distributie (configuratie net, beïnvloeding waterverdeling en manipulaties pompregiem) zó organiseert, dat het kwaliteitsverloop wél te beheersen en te controleren is.

Juist bij de realisering hiervan zal de waarde van een dynamisch rekenmodel, dat de dynamische processen kan beschrijven, uitermate belangrijk zijn.

De microbiologische kwaliteitsachteruitgang tijdens de distributie wordt nog vaak voorkomen door aan het eind van het zuiveringsproces te chloren. Deze maatregel heeft echter het nadeel van de vorming van ongewenste chloorverbindingen (gechloreerde en gebromeerde koolwaterstoffen).

Het is dan ook beter om kwaliteitsachteruitgang te voorkomen met preventieve maatregelen opdat chloren niet nodig is. Dit is onder andere te bereiken door het realiseren van korte verblijftijden in het net. Hiervoor is een goed inzicht nodig in het functioneren van het beschouwde leidingnetwerk en de overige distributiemiddelen. Dit inzicht kan verkregen worden door de dynamische processen te simuleren. Hierdoor wordt kennis verkregen in de ligging en beweging van de eventuele aanwezige menggebieden van verschillende watersoorten, van pendel- en stagnatiezones, alsmede van de tijdsafhankelijke variaties als gevolg van het pompregiem en het afnamepatroon.

I.2 KWALITEIT EN DISTRIBUTIE

In de hierna volgende tekst wordt verder ingegaan op de relatie tussen kwaliteit en distributie. Behandeld worden de biologische en de corrosie-aspecten, terwijl ook bijzondere kwaliteitseffecten aan de orde komen.

Biologische aspecten

Voor DOC geven de "VEWIN Aanbevelingen" de maximumwaarde van 5 mg/liter bij het verlaten van het zuiveringsbedrijf.

Het komt voor dat het jaargemiddelde van de aanvangswaarde vóór het distributieproces ("af pompstation") dicht tegen deze DOC-norm aanligt. Dit is ook het geval voor de Amsterdamse situatie bij het RP-water. Het is sterk afhankelijk van de bron en het zuiveringsproces. Per saldo zal het DOC-gehalte tijdens de distributie afnemen, echter nagroei in het distributienet, gecombineerd met lange verblijftijden, zal deze waarde lokaal boven de norm kunnen tillen als gevolg van sedimentatie, detritus en een slechte doorstroming.

Omdat micro-organismen voor hun levensprocessen zuurstof verbruiken, daalt het O_2 -gehalte van het drinkwater versterkt als gevolg van het chemisch zuurstofverbruik zoals van oxydatie. Dit kan voor extreme situaties, zoals doodlopende leidingeinden (waaronder spruitleidingen van brandkranen) zelfs zo ver gaan, dat het water anaeroob wordt. In die situatie treden micro-biologische en chemische processen op, waarbij smaakstoffen gevormd worden. Een voorbeeld hiervan is de reductie van sulfaat tot zwavelwaterstof die optreedt in gietijzer-roestgebieden. Tevens is een verhoging van de troebelingsgraad het gevolg. Om adequate maatregelen te kunnen nemen moeten deze plaatsen in kaart worden gebracht.

Uit stagnatie-onderzoekingen (lit. 2) is gebleken dat er recht-evenredige verbanden bestaan tussen de contacttijd van het drinkwater met het leidingmateriaal, de dimensies van de leiding, de Fe-afgifte en de toename van de troebeling c.q. afname van het O_2 -gehalte, zie fig. 1.

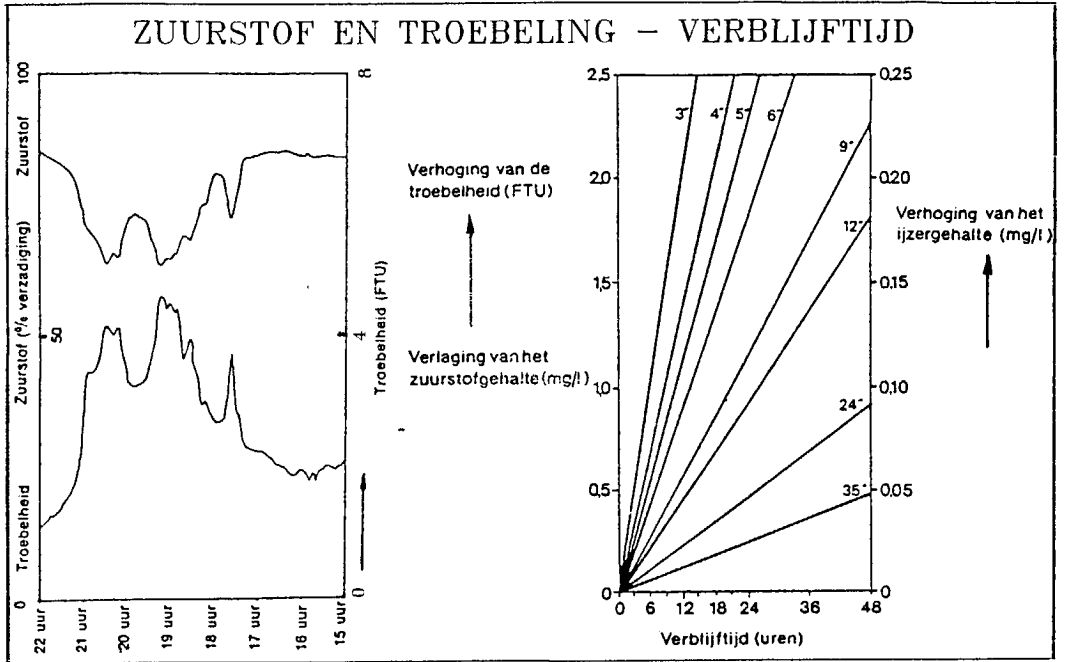


fig. 1 Het verband tussen Fe en O₂ en de invloed van de middel-
lijn en de verblijftijd op de troebeling (bron lit. 2).

Voor de distributie vormen de organische verbindingen, gemeten in TOC, een belangrijke groep. Een deel van deze organische stoffen is namelijk direct beschikbaar als voedsel voor bacteriën en andere hogere organismen in het leidingnet; een deel hiervan wordt gemeten in het assimileerbare AOC. Een hoog AOC-getal (en dat betekent vaak een hoog TOC-getal) geeft aanleiding tot hoge biologische activiteit. Dit komt vooral voor bij hogere temperaturen, zoals bij distributie van oppervlaktewater in de zomer en wisselingen van verschillende watersoorten (mengzones van RD- en RP-water).

Een direct gevolg hiervan is bacteriegroei, die weer hoge kolonieggetallen tot gevolg heeft, met soms afwijkende smaak, reuk en een verhoogde troebeling, één en ander ten gevolge van stofwisselingsprocessen. (Beïnvloeding van de zogenaamde organoleptische, ofwel zintuiglijk waarneembare eigenschappen).

Nagroei van (hogere) organismen en de aanwezigheid van de bacteriën van het geslacht *Aeromonas* hangen niet alleen af van het deel AOC van het totale organisch stofgehalte (TOC), maar vooral van de onderhoudstoestand van het leidingnet en de stroomsnelheid in het net.

Uit het bovenstaande blijkt dat het gewenst is de mate van de kwaliteitsverslechtering te beperken door beheersing van het distributieproces. Het rekenmodel zal hierbij een belangrijk hulpmiddel kunnen zijn (lit. 25).

Corrosie-aspecten

Van specifiek belang voor de waterkwaliteit zijn het corrosieproces, de afgifte van Fe aan het water en de sedimentatie van corrosieprodukten. Verwezen wordt hiervoor naar lit. 5 waarin wordt aangegeven dat de Fe-afgifte afhankelijk is van de structuur van de corrosielaag (scaling) in leidingen. Deze Fe-afgifte is op zijn beurt weer afhankelijk van kwaliteitsparameters van het drinkwater zoals hardheid, SI, O_2 , buffercapaciteit (HCO_3) en de pH. De overdracht van Fe naar water is ook afhankelijk van de stroomsnelheid van het water ter plaatse van de buiswand.

Naast genoemde parameters zijn te noemen de invloed van Cl, SO_4 en Na. Hiernaar zal nog onderzoek gedaan moeten worden. Wel is reeds gebleken dat bij waarden van Cl groter dan 100 mg/l de corrosiesnelheid aanmerkelijk toeneemt.

Roestdeeltjes en afzettingen vormen een goed substraat voor de groei van bacteriën, schimmels en actinomyceten, met alle nadelige gevolgen van dien voor de kwaliteit.

Organische stoffen oefenen in het algemeen een remmende werking uit op het corrosiegedrag. In lit. 6 wordt geconstateerd dat de meeste corrosieproblemen optreden in watertypen met een laag gehalte aan opgeloste organische stof, een hoog Cl- en SO_4 -gehalte en een lage buffercapaciteit van het water, terwijl van de stromingssnelheid gezegd kan worden dat, na stabilisatie van de scaling, de corrosiesnelheid lager wordt naarmate de snelheid

hoger is. Vooral periodiek stagnerend water bevordert het corrosieproces!

Bijzondere kwaliteitseffecten

Uit het oogpunt van de distributie is het nuttig om in te gaan op enkele hieronder aangegeven bijzondere kwaliteitseffecten.

Na onderzoeken (lit. 2) is ten aanzien van troebeling en Fe een aantal belangrijke kwaliteitseffecten geïnventariseerd met kenmerkende kwaliteitsverlopen. Dit behoeven niet alleen nachtsituaties met lage afnamen te zijn. Ook de volgende situaties kunnen aanleiding geven tot kwaliteitsverslechtering:

- op distributieleidingen nabij de aansluiting op een grote hoofdleiding ter plaatse van waterscheidingen van twee, of meer watersoorten;
- het veelvuldig optreden van stroomomkeringen in leidingen met sedimentatie;
- lokaties waar kortstondige of blijvende veranderingen in de stroomsnelheid optreden;
- lokaties met verschuivingen van overgangszones tussen invloedsgebieden (pendelen).

De volgende praktijkwaarnemingen laten zien dat vaak verscheidene effecten tegelijk de kwaliteit bepalen

1. Het optreden van "zaagtandeffecten" in het troebelheidsverloop. Dit periodiek repeterende effect kan optreden op plaatsen in leidingen met een kleine middellijn die op korte afstand liggen van hoofdleidingen met grote afmetingen. Indien de plaats bijvoorbeeld in een 5"-leiding op korte afstand gelegen is van een 20"-hoofdleiding, ontstaat gedurende de stagnatieperiode een toename van de troebeling op die plaats volgens fig. 2, met aanvankelijk een gradiëntverloop volgens een 5"-effect, later afgezwakt door het 20"-effect.

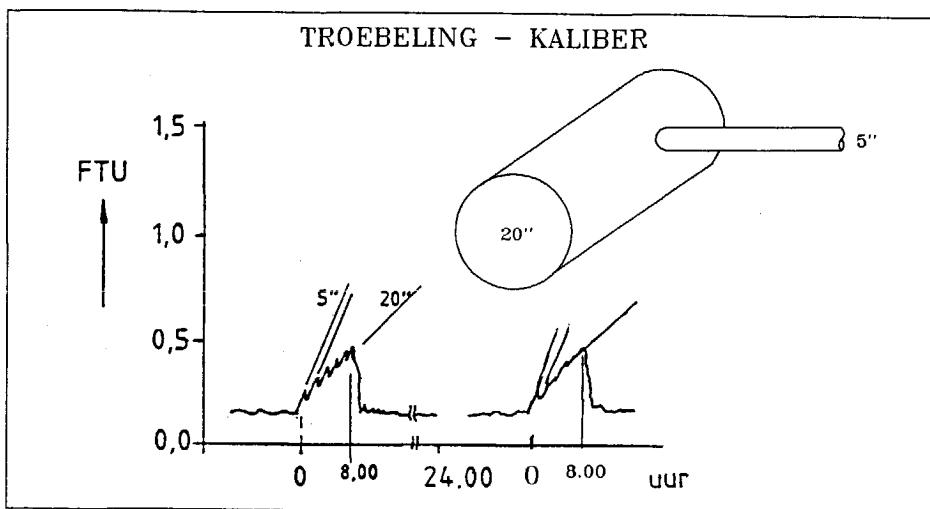


fig. 2 Optreden van periodieke verhogingen van de troebeling (bron lit. 2).

2. Het optreden van plotselinge verhogingen van de troebelheid bij omkering van stroomrichting, zie fig. 3.

Het uit bedrijf nemen van een pompstation kan, afhankelijk van de ligging ten opzichte van de wijk, tot omkering van de stroomrichting leiden. Als gevolg hiervan kan de aanvoer van water plaatsvinden vanuit verder in de wijk liggende delen van het net. Indien dit water afkomstig is van optredende stagnatiezones, kan zich een plotselinge, zeer aanzienlijke verhoging van de troebelheid voordoen. Ook kan het verloop van de troebelheid worden veroorzaakt door het effect van de voorliggende en dus eerder doorlopen leiding of door de leidingen in de wijk zelf.

De aanwezigheid van transportabele hoeveelheden ijzerslib kan aanleiding zijn tot kortstondige wisselingen in troebelingsniveau.

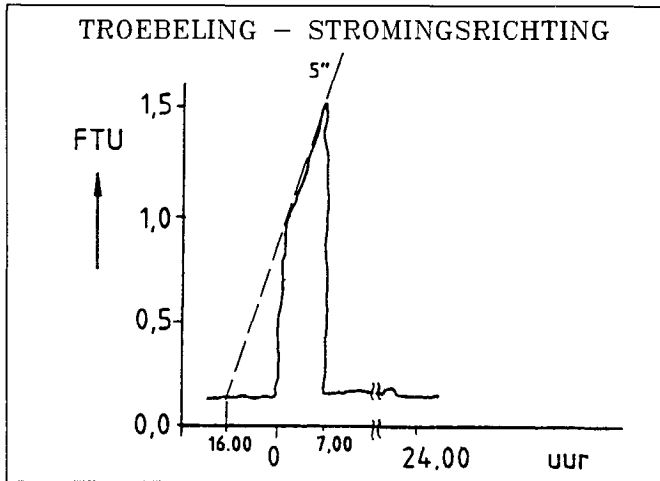


fig. 3 Toename troebeling door omkeringen in de stroomrichting (bron lit. 2).

3. Een periodiek variërend troebelingsniveau als gevolg van verschuivingen van invloedsgebieden bij verscheidene voedingspunten. Om die reden mag het aantal voedings- of instroompunten per wijk niet te groot zijn, bijvoorbeeld niet meer dan 2, maximaal 3; hierdoor wordt ook het aantal lokale waterscheidingen beperkt.
4. Naast dit alles kan gesteld worden dat het water in het distributienet vooral in de wijken in de periode tussen 0.00-7.00 uur, door de geringe afname niet of nauwelijks ververscht wordt. Overdag zal de verversing in het algemeen groter zijn. Maar men kan ook dan "niet goed doorstroomde gebieden" onderkennen op de plaats van waterscheidingen door de vermaasdheid van het net en/of de veelzijdige voedingen.
5. Plotselinge kortstondige verhogingen van de troebeling ontstaan omstreeks 7.00 uur door de snelle toename van het verbruik (ontwaken van de gebruikers).
De overgang van het lage nachtverbruik naar het veel hogere dagverbruik kan bij aanwezigheid van, in de nachtperiode

ontstane, geringe hoeveelheden transportabele roest, leiden tot een kortdurende opwerveling van het ijzerslib en daarmee tot een verhoging van de troebeling.

Een voorbeeld van een 5" leiding is in fig. 4 weergegeven.

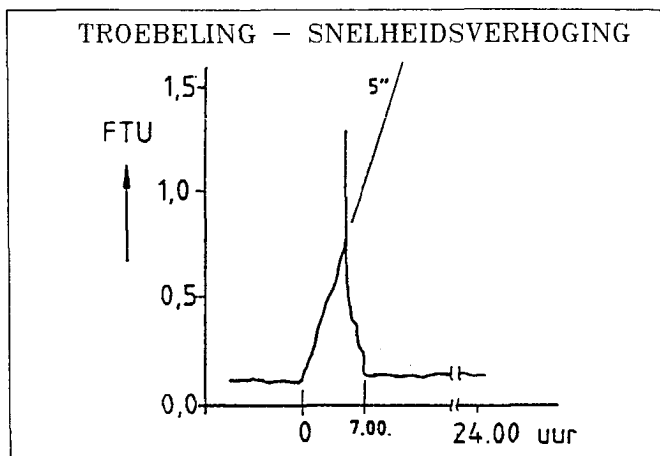


fig. 4 Toename troebeling ten gevolge van "ontwaken stad" (bron lit. 2).

Tenslotte dient te worden opgemerkt dat de troebeling als gevolg van Fe-afgifte sterk afhankelijk is van de verblijftijd, maar óók van andere parameters zoals temperatuur en O_2 .

Al deze verschijnselen duiden op de voortdurende noodzaak tot optimaliseren van zowel het technisch leidingnetbeheer als de waterstroombeheersing (snelheid en richting).

Een aantal nadelige effecten in probleemgebieden kan verminderd worden door speciale maatregelen, zoals:

- het kunstmatig bevorderen van de afname (permanent spuien of directe aansluiting grote afnemers);
- een gedwongen stromingsverloop (manipulaties met pompstations, afsluiters in combinatie met aanjagers en/of in het distributiegebied gelegen hoogreservoirs);
- het zoneren.

Het distributiesysteem dient hiertoe uitgerust te zijn!

Mede naar aanleiding van bovenstaande kwaliteitsbeschouwingen moeten transport- en distributiesystemen onder andere voldoen aan de onderstaande eisen:

- het kunnen volgen van de afnamebehoeften;
- het waarborgen van de leveringszekerheid;
- de laagst mogelijke aanleg- en exploitatiekosten.

De volgende maatregelen verdienen hierbij aandacht:

- bij het ontwerpen van nieuwe leidingnetten verdient het aanbeveling om naast de kwaliteitsaspecten hoeveelheid en druk ook de (constante) waterkwaliteit te betrekken, zodat het ontstaan van probleemgebieden wordt voorkomen en een optimalisatie wordt verkregen tussen kwaliteit en kosten; dit komt tot uitdrukking in:

- * het bevorderen van een goede doorstroming en het verminderen van de verblijftijd door:
 - . een gering aantal waterscheidingen en stagnatiezones,
 - . een gering aantal goed gesitueerde en eventueel telemetrisch te bedienen instroompunten per wijk (maximaal drie),
 - . gedurende de nachtelijke uren de wijken in serie te laten doorstromen,
 - . een zo gering mogelijke leidinginhoud (dat wil zeggen een zo klein mogelijke middellijn),
 - . beheersing van de doorlopen trajecten;
- * een juiste keuze van het leidingmateriaal (geen beïnvloeding van waterkwaliteit),
- * het reeds bij het ontwerp inbouwen van appendages ten behoeve van een efficiënt onderhoud (water- en luchtspoelen, propfen) en ten behoeve van de waterkwaliteits- en de hydraulische controle,

- * het toepassen van maatregelen bij grote afnemers, of afnemers met sterk - plotseling - wijzigende waterbehoeften:
 - . direct aansluiten op een hoofdleiding,
 - . voorzien van een (eigen)reservoir;
 - * het zonodig toepassen van hoogreservoirs;
- bij het ontwerpen van pompstations dient een flexibel pompregiem uitgevoerd te kunnen worden ten behoeve van:
- * het vastleggen van de begrenzings van de watersoorten (dus het vastleggen van de invloedsgebieden),
 - * het door middel van een juiste pompconfiguratie en pompregiem meer subtiel inspelen op de regionale momentane behoefte aan meer of minder water. Dit vereist een optimalisatie van de op te stellen pompeenheden. Aan de ene kant zullen de gevraagde hoeveelheden effectief gevolgd moeten kunnen worden, aan de andere kant is er het streven naar een economisch verantwoorde opstelling. Met andere woorden: meer kleine, of enkele grote, eventueel regelbare, pompen.

I.4 LITERATUURONDERZOEK

In de afgelopen jaren is door mij consequent de literatuur gevolgd, in het bijzonder die over distributie en rekenmodellen. De geraadpleegde literatuur bestond onder meer uit de gangbare Nederlandse, Engelse, Duitse, Franse, Amerikaanse en Japanse rapporten en tijdschriften zoals die in de bedrijfstak bekend zijn. Daarnaast is gebruik gemaakt van de gemeentelijke bibliotheken en van geautomatiseerde zoeksystemen die op wereldschaal toegang geven tot de bestanden van universiteiten.

De voornaamste opmerkingen naar aanleiding van dit onderzoek zijn:

- * Drinkwaternetwerken zijn in de regel zeer complex. Ze bestaan uit reservoirs, distributiepompstations, het er op het aangesloten leidingnet met drukbeveiligingsinstallaties, aansluitingen naar de afnemers, brandbestrijdingsvoorzieningen en de sturing van het geheel waarvoor onder meer controlemeetpunten nodig zijn.

Het is mogelijk in de samenhang van de distributiemiddelen een HIËRARCHISCHE structuur met drie niveaus te onderkennen, namelijk:

- het PRIMAIRE (HOOFDLEIDINGEN)NIVEAU. Dit omvat de distributiepompstations met reservoirs en eventuele watertorens. Het verbindt deze met elkaar en voedt de regionale hoofdleidingnetten. Het vormt één net, verspreid over het gehele distributiegebied;
- het REGIONALE (HOOFDLEIDINGEN)NIVEAU. Dit bestaat uit verscheidene deelgebieden van regionale hoofdleidingnetten die aangesloten zijn op de hoofdleidingen van het primaire niveau. Zij voeden de distributieleidingen van het leveringsniveau en verbinden de buurten en wijken binnen één regio;
- het LEVERINGSNIVEAU. Dit wordt gevormd door de in buurten en wijken gegroepeerde distributieleidingen met aansluitingen voor de leveringen en de openbare brandbestrijdingsvoorzieningen; het wordt gevoed door het regionale hoofdleidingnet.

Op de hoofdleidingen zijn in de regel geen aansluitingen en brandkranen aangesloten, wel drukbeveiligingsinstallaties. In elk niveau kunnen controle-meetpunten voorkomen en eventueel sturingsmiddelen voor het distributieproces.

Tot op heden is in de literatuur aan de samenhang van deze van elkaar afhankelijke niveaus geen aandacht geschonken. Vanwege het feit dat de dimensies van matrices in de beschrijvende wiskundige vergelijkingen groot zijn, is het uitsplitsen in genoemde niveaus bij modellering van belang. Hierop zal in hoofdstuk II nader worden ingegaan.

- * Mondiaal zijn er tal van rekenprogramma's in gebruik zoals WATER, WANACA, WATLEI, het KIWA-programma ALEID in Nederland en verder WATSIM, WSSM, WATNET, enzovoort (bijlage 1, deel 3). De toepassingsmogelijkheden van deze rekenprogramma's zijn beperkt. Zij richten zich uitsluitend op het berekenen van momentane stromingssituaties in een leidingnet. In de basisvergelijking wordt daarbij in het algemeen de kwadratische stromingsterm voor de wandruwheid gelineariseerd. De berekening

verloopt iteratief waarbij de stroming in de buizen of de druk in de knopen wordt vereffend. Veelal wordt uit het drukverschil over een buis de stroming bepaald. Gezien de problematiek van overgedimensioneerde leidingen bij sterk vermaasde netten en de hierdoor optredende zeer kleine drukverschillen, zie lit. 25 onder "Doorlichtingen in het Amsterdamse distributienet", is dit geen nauwkeurige methode. Bij de hier gekozen oplossingsmethode voor permanente stromingen is het dan ook beter om het drukverschil uit de stroming door de buis te bepalen.

- * De huidige situatie van telemetrische regel- en besturingsmogelijkheden, de technische ontwikkelingen in de automatisering en de tendens van steeds lagere kosten van hard- en software rechtvaardigen de ruimere gebruiksmogelijkheden van computers. Daarbij valt nog apart te noemen de huidige ontwikkelingen rond Leidingen- en Verbruikers InformatieSystemen waarmee in de toekomst koppelingen mogelijk zijn met rekenmodellen als deze.
- * Bij de omzettingen van een werkelijk net naar een schematisatie wordt veelal ad hoc te werk gegaan, omdat geen fundamentele kennis bestaat omtrent het schematiseren van netten. Bij aggregatietechnieken zal met name gelet moeten worden op de invloeden van veronderstelde zwakke relaties tussen deelnetten die verwaarloosd kunnen worden.
- * Grote problemen voor elk type berekening van bestaande netwerken worden gevormd door de bepaling van de werkelijke weerstanden als gevolg van wandwrijving, vertragingsverliezen in bochtstukken, afsluiters en dergelijke en de schatting van nagroei op de buiswand, de gevormde scaling aan de buiswand en sedimentatie.
- * Verbruikcijfers zijn in de regel gemeten op jaarbasis. Voor enkele distributiebedrijven, waaronder Amsterdam, is in het bijzonder de problematiek omtrent de huishoudelijke verbruiken te noemen, omdat deze niet zijn bemeterd. Slechts de jaarverbruiken van alleen het groot en klein zakelijk verbruik zijn bekend. Dit heeft consequenties bij het modelleren. Ten aanzien

van de gevoeligheid bij de ijking van het rekenmodel kan dit een mogelijke foutenbron zijn.

Als belangrijkste conclusies uit het literatuuronderzoek kunnen worden genoemd:

- Door recente verbeteringen op het gebied van computerapparatuur zullen modelberekeningen met computers een steeds belangrijker plaats gaan innemen bij de bedrijfsvoering van waterleidingbedrijven (lit. 1, 3 en 4).
- De leveringszekerheidsgedachte van weleer leidde veelal tot sterk vermaasde netwerken die bovendien vaak overgedimensioneerd werden. Dit heeft nadelige effecten op de waterkwaliteit. Van hieruit is thans een sterke innovatiebehoefte gegroeid naar netverbetering met een verschuiving van leveringszekerheid naar kwaliteitszekerheid.
Inzicht in netdoorstroming, gebaseerd op simulatieberekeningen met iedere gewenste in- en uitvoer tijdstapgrootte, is nog steeds een leemte in het gehele proces van winning tot en met levering aan de consument. Er is (grote) behoefte aan een model waarmee, op basis van dynamische stromingsberekeningen, onder andere reistijden van deelstromingen met de bijbehorende trajecten door een net bepaald kunnen worden (lit. 3 en 4).
- Nader onderzoek zal zeker moeten plaatsvinden op een aantal gebieden zoals afnamepatronen van zowel het huishoudelijk verbruik als van de (industriële) grootafnemers teneinde werkelijk "zuiver voorspellend" te kunnen modelleren en voor de ontwikkeling van "vraagvoorspellingstechnieken", voor zowel de korte als lange termijn voorspellingen van het waterverbruik.
- Gezien het belang van de volksgezondheid en het hoge investeringsniveau van infrastructurele werken (de vervangingswaarde van het leidingnet van Amsterdam bedraagt circa 1 miljard gulden) is de ontwikkeling van een dynamisch rekenmodel een hoogst verantwoorde inspanning. Te meer daar de meerwaarde hiervan bij gebruik op vele fronten positieve baten oplevert;

zoals kwaliteitsonderzoek, ligging menggebieden, vaststelling monsterpunten, wijziging netconfiguratie, enzovoort; zie hiervoor de genoemde ontwerpvoorschriften en maatregelen in I.3 en lit. 25 onder "De toepassingen op de Amsterdamse situatie".

I.5 VERSCHILLEN TUSSEN STATISCHE EN DYNAMISCHE REKENMODELLEN

Onderscheid kan worden gemaakt tussen statische en dynamische rekenmodellen. De kenmerkende verschillen tussen deze modellen worden hier verder uitgediept.

- Bij een statisch model wordt het tijdsafhankelijke proces als het ware voor één gekozen tijdstip vastgezet en voor die gekozen momentane situatie van instromen en afnamen het bij dat moment behorende stromingsbeeld in een net berekend (drukken en snelheden).
- Bij het dynamisch model wordt uitgegaan van continue tijdsafhankelijke vergelijkingen die het hydraulische beeld beschrijven en van tijdsafhankelijke invoergegevens, zowel voor de instromen in het net door pompen en dergelijke als voor afnameverdelingen over het distributiegebied. Dit levert een uitvoer op van tijdsafhankelijke drukken en stromingen over een willekeurig te kiezen periode. Op basis van deze gegevens is het mogelijk verdere modellering uit te voeren ten behoeve van kwaliteitsbeschouwingen en simulaties voor de bedrijfsvoering.

Opmerkingen

De tijdbasis van de dynamische processen is zodanig groot (van 1 minuut tot 1 uur) dat geen drukgolven afkomstig van waterslageffecten worden beschouwd.

Inhoudelijk richt een statisch programma zich uitsluitend op beperkte ontwerp- en controle-aspecten met als basis slechts één gekozen tijdstip (waarbij geen rekening gehouden kan worden met de gradiënt van de volumestroom voor dat tijdstip). Het is echter de vraag of dit tijdstip inderdaad wel het representatieve is (moet

dit een maximum, een minimum of juist een tussenliggende waarde zijn?).

In principe is een statisch programma ook voor meer achtereenvolgende tijdstippen uit te voeren (semi-dynamisch, lit. 3). Als er geen "vertragende" elementen zoals watertorens, reservoirs en dergelijke in het net aanwezig zijn en er geen voorspellingen gewenst zijn met betrekking tot de waterkwaliteit (pendelzones, troebelheid, verblijftijden op wijkniveau, en dergelijke) dan kan dit tot aanvaardbare uitkomsten leiden. Zijn deze elementen wel aanwezig en zijn kwaliteitsberekeningen gewenst, dan moet dynamisch gerekend worden.

Wanneer semi-dynamisch wordt gerekend worden de impulseffecten, die afkomstig zijn van de volumestroomgradiënten en juist vooral op leveringsniveau belangrijk zijn, niet meegenomen. Waardoor modellering niet compleet is.

Het is eleganter om één continue simulatieberekening uit te voeren over de gewenste periode met een dynamisch model.

Bij een dynamisch model is het mogelijk om naast ontwerp en controle ook analyses te verrichten omtrent het gebruik van de technische middelen, zoals het leidingnet, de pompstations, reservoirs en regelorganen, waarbij als resultaat een betere afstemming van de technische structuur op de tijdsafhankelijke verbruikstructuur kan worden verwacht. Bovendien, is het pas goed mogelijk reistijden van stromingen via de daarbij behorende stromingstrajecten en de veranderingen van de kwaliteitsparameters zichtbaar te maken, wanneer deelstromingen zo continu mogelijk in een net gevolgd kunnen worden waarbij juist impulseffecten niet verwaarloosd worden. Door dit verbeterde inzicht kunnen maatregelen worden genomen om ongewenste veranderingen zoveel mogelijk tegen te gaan. Ofwel: met een dynamisch rekenmodel is een actieve beïnvloeding van het distributieproces mogelijk.

Goed onderbouwde (beleids)beslissingen kunnen worden genomen op grond van rationele argumenten (bijvoorbeeld minimalisatie van verblijftijden). Dit is van groot belang teneinde de resultaten van de (grote) zorg voor goede bronnen en de toegevoegde waarde, verkregen bij de zuivering, niet (sterk) te laten verminderen door het transport en de distributie van het water tot en met de aflevering.

Niet alleen civieltechnische aspecten, waar in het verleden veelal de aandacht naar uitging, zijn van belang voor een goede uitvoering van de distributie. Naast deze zijn ook de hydraulische processen, alsmede de chemische- en microbiologische interacties tussen het water en de leidingmaterialen belangrijk. De tijd is voor dit alles een gewichtige parameter, vooral in relatie tot de processen tijdens het verblijf van het drinkwater in de leidingtrajecten en de reservoirs. Als gevolg van het ontbreken van dynamische rekenmogelijkheden ten aanzien van netdoorstroming en door gebrek aan metingen zijn bovenstaande relaties nu nog vrij onbekend. Dynamische rekenmethoden kunnen hierin helderheid verschaffen en een operationele hanteerbaarheid aanreiken. Het gebruik richt zich dan ook op de totale technische inrichting van de distributie, zoals pompstations, reservoirs, (telemetrisch) bestuurd afsluiters, aanjagers, de netconfiguratie en de regeling van het geheel.

Over het nut van bijvoorbeeld op afstand bestuurd afsluiters en aanjagers in een net het volgende. Een veel voorkomende situatie is dat een stromingsbeeld alleen wordt bepaald door het afnamegedrag van de consumenten en een vast pompregiem. Bij zo'n situatie overheerst op wijkniveau de afname en op transportniveau de instroming, afkomstig van de pompen. Dit is een tamelijk passieve situatie, waarbij men weinig of geen greep heeft op het voorkomen van een eventuele kwaliteitsachteruitgang. Zou men dit wel willen, dan moet het mogelijk zijn stromingen te beïnvloeden, bijvoorbeeld met behulp van afsluiters en/of aanjagers, waardoor een bewuste sturing van de waterstromen door de wijken mogelijk wordt. Deze actieve beïnvloeding is eigenlijk alleen goed mogelijk wanneer met een dynamisch model onderzoek is gedaan naar lokaties en effecten van zulke middelen.

Een belangrijke conclusie uit het zogenaamde "Kwaliteit Stad" onderzoek (KWAAT), uitgevoerd door Gemeentewaterleidingen Amsterdam en het KIWA in de periode 1980-1984 (lit. 2), is om naast de conservatieve beheersmaatregelen vooral een dynamisch beheer te stimuleren; pas dan kunnen knelpunten vermeden worden in de kwali-

teit, zoals het lokaliseren en vervolgens opheffen van ongewenste stagnatie- en (brede) pendelzones en het beheersen van menggebieden van verschillende watersoorten, dat wil zeggen verkleining en/of vastlegging van deze gebieden (mogelijk door zonering). Door nu voor één en ander simulatieberekeningen uit te voeren, wordt een belangrijk element verkregen in een op criteria gestoeld "Distributie Beheer Plan". Het belangrijkste verschil met de aanpak uit het verleden is dat symptoombestrijding wordt vervangen door eliminatie van oorzaken.

Ter illustratie het volgende: het komt voor dat pompregiems ter voorkoming van bijvoorbeeld roestklachten niet gewijzigd worden. Immers, (plotselinge) veranderingen van waterstromen kunnen leiden tot opwerveling van het in de loop der tijd gevormd sediment.

Het voorkomen van deze gevolgen moet mijns inziens vanuit een andere invalshoek bekeken worden. Het is beter om de oorzaak weg te nemen door voldoende snelheid in leidingen te creëren, zodat sediment zich niet kan vormen, bijvoorbeeld door betere wijkdoorstroming. Een bijkomend voordeel is dat dan minder schoonmaakactiviteiten nodig zullen zijn.

Op basis van ervaringen met het gebruik van rekenmodellen, zowel binnen Gemeentewaterleidingen als binnen de bedrijfstak, is tabel 1 samengesteld; ze geeft een overzicht van toepassingsmogelijkheden voor statische en dynamische rekenmodellen (lit. 3). In deze tabel komt de meerwaarde van het dynamische model duidelijk naar voren.

<u>Aandachtveld</u>	<u>Statisch</u>	<u>Dynamisch</u>
Inzichtverhogend	X	XX
<u>Ontwerpen van</u>		
. pompstations, reservoirs e.d.	X	XX
. leidingnetten	X	XX
. meet- en bewakingssysteem	O	XX
<u>Calamiteiten</u>		
. uitval van pompstations	X	XX
. lekken simulaties	X	XX
. sluitingsplannen	O	XX
. leveringszekerheid	X	XX
<u>Kwaliteit</u>		
. optimale dimensionering (middellijn, configuratie, aantal pompen en pompregiem)	X	XX
. verblijftijd bepaling	O	XX
. parameterveranderingen	O	XX
. volgen van netverontreinigingen	O	XX
. studies van alternatieve oplossingen	O	XX
. sturing waterstromingen	O	XX
. onderbouwing van het Distributie Beheer Plan	X	XX
. energiebeschouwing	X	XX
. gebruik van het net en pompen	O	XX
<u>Automatisering</u>		
. basisprogramma voor sturing van het distributieproces	O	XX

tabel 1 Toepassingsmogelijkheden

O = niet toepasbaar

X = toepasbaar

XX = beter toepasbaar

I.7 PLAATS VAN HET REKENMODEL IN HET LICHT VAN DE KWALITEITSBEWAKING

De kwaliteitsbewaking na de zuivering wordt vooral uitgevoerd door het wettelijk voorgeschreven analyseren van watermonsters op vaste monsterpunten en tijdstippen. Dit (routinematige) laboratoriumonderzoek is, zoals het veelal wordt uitgevoerd, tweeledig, namelijk:

a. ter voorkoming van wanverbindingen.

De aard van de verontreiniging kan bacteriologisch of chemisch zijn. Hiervoor is beperkt onderzoek nodig naar een aantal parameters zoals EGV, pH, troebelings, Cl en E.coli, de laatste als indicatorparameter voor de bacteriologische-hygiënische kwaliteit;

b. bewaking van de kwaliteitsveranderingen in de tijd.

Hiervoor is naast bovengenoemd parameter-onderzoek meer nodig, zoals bepaling van de verblijftijd, de watersoort, (micro)-biologische en organoleptische parameters, maar ook kennis van het net en van de waterverdeling. Dit laatste omvat de leidingconfiguratie, buismaterialen, stromingssituaties, pompregiems en het afnamepatroon.

Aangezien voor vele laboratoria van waterleidingbedrijven geldt dat het huidige routinematige onderzoek volgens een vast patroon in de tijd (altijd overdag op ongeveer hetzelfde tijdstip) en op vaste plaatsen (vaak openbare gebouwen) wordt uitgevoerd, is het duidelijk dat dit onderzoek zich vooral leent voor doelstelling a. De waterleidingwet stelt hiervoor een minimum aantal meetpunten vast, afhankelijk van de grootte van het net en het inwonersaantal. Dit geeft echter geen inzicht in het verloop van de kwaliteit in de tijd (doelstelling b.).

Thans kunnen normoverschrijdingen gedurende lange tijd onopgemerkt blijven!

Het is beter naast dit wettelijke, routinematige onderzoek op geselecteerde plaatsen gedurende representatieve perioden (even-

tueel permanent) het distributienet continu te bemonsteren. Dan dienen vooral de hiervóór behandelde kwaliteitseffecten in oogenschouw genomen te worden. Dit onderzoek moet uitgevoerd worden naast het verrichten van dynamische-modelstudies die het nodige inzicht geven in het verloop van stromingen, drukken, trajecten met reistijden en die selectief de plaatsen van de meetpunten kunnen vaststellen. Alternatieve oplossingen voor netverbetering kunnen met dynamische modelstudies berekend worden alvorens zij worden uitgevoerd. Na het uitvoeren van de netverbeteringen kunnen de resultaten weer door middel van continu-metingen gecontroleerd worden.

Continu-metingen kunnen op vaste door het rekenmodel geselecteerde lokaties worden ingezet, bij kwetsbare consumenten en op willekeurige plaatsen. De metingen kunnen deels worden uitgevoerd met mobiele meetstations die na een periode weer elders opgesteld worden. Door middel van het uit een dergelijk continu onderzoek verkregen inzicht kan een betere diagnose gesteld worden van het functioneren van de distributie.

Dynamische berekeningen cq. simulaties, gesteund door continu-metingen en de benodigde technische middelen resulteren in een gecontroleerde beïnvloeding van de waterstromen vanaf de zuivering tot de consument. Hiermede is een algehele beheersing van de distributie bereikt.

Fig. 5 geeft een overzicht hoe het gebruik van het dynamisch rekenmodel in het totale proces van distributie, inclusief de kwaliteitsbewaking, past.

Op deze wijze wordt de kwaliteitsbeheersing rationeel en dient zij als basis voor een optimaal distributiebeheermanagement zodat beter dan voorheen aan de verwachting van de consument ten aanzien van het produkt drinkwater kan worden voldaan.

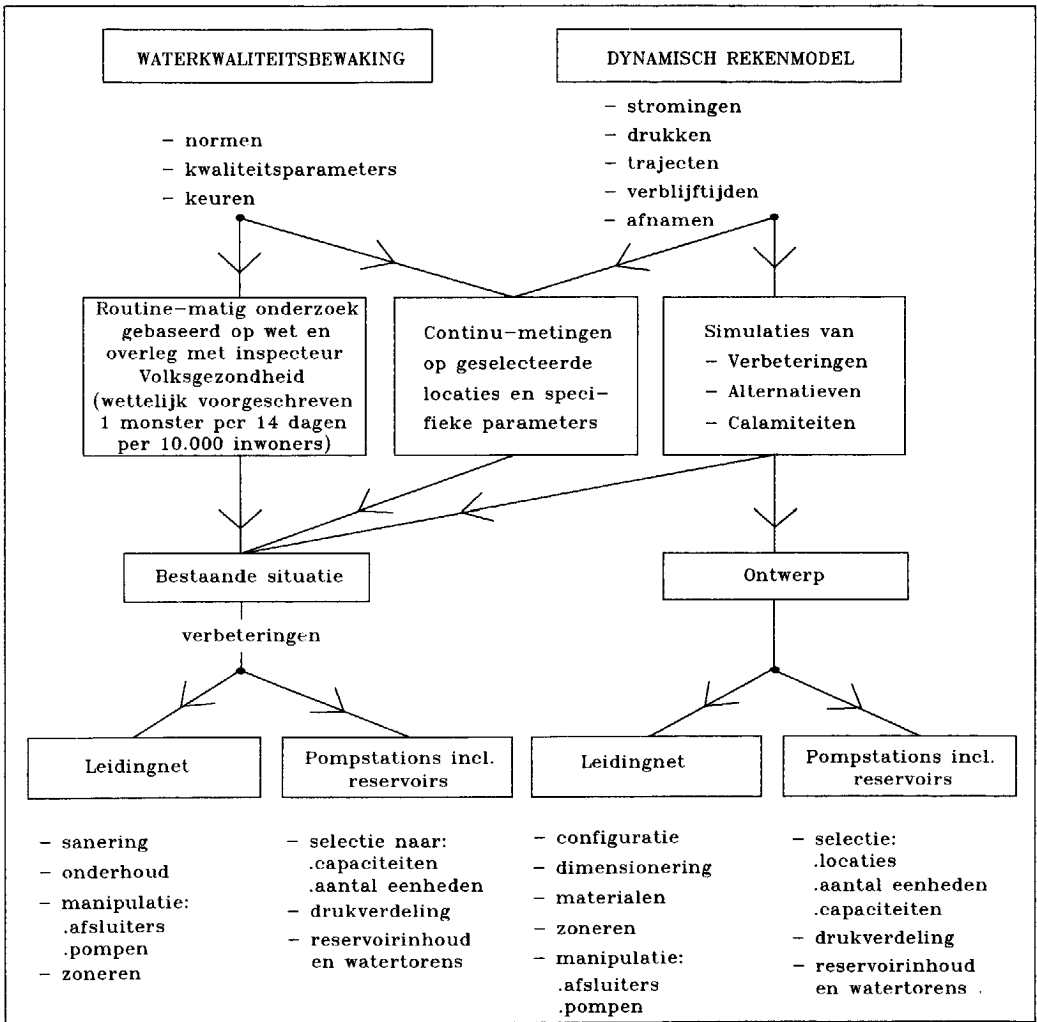


fig. 5 De plaats van het rekenmodel bij de inrichting en de bewaking van de distributie.

Uit voorgaande algemene beschouwingen, alsmede naar aanleiding van de specifieke Amsterdamse ervaringen (zie lit. 25 hoofdstuk I "Analyse huidige situatie Amsterdam"), is voor een zo breed mogelijk toepassingsgebied van het rekenmodel het volgende pakket van eisen opgesteld:

- het model moet toepasbaar zijn op de verschillende binnen de HIËRARCHISCHE structuur van het distributienet gelegen deelgebieden. Er dient rekening te worden gehouden met de onderlinge beïnvloeding van deze deelgebieden; vooral op het leveringsniveau liggen de kwaliteitsproblemen (zoals stagnatie, lange verblijftijden);
- het model moet TIJDSAFHANKELIJKE hydraulische berekeningen en SIMULATIES van sterk vermaasde, eventueel overgedimensioneerde hiërarchisch gestructureerde leidingnetten kunnen uitvoeren; een en ander bij verschillende relevante tijdstappen, die uit de hiërarchische structuur en kenmerken voortvloeien. Dit omvat:
 - * het nabootsen van:
 - . variabele en tijdsafhankelijke afnamepatronen,
 - . pompregiems, rekening houdend met pompkarakteristieken en voor- en persdrukken (pompen en eventueel buffers bevinden zich buiten, aan de rand van, of binnen het beschouwde net);
 - * het berekenen van de volgende hydraulische waarden:
 - . de drukverliezen tussen de knooppunten,
 - . de drukhoogten in de knooppunten,
 - . de stroomsnelheden en - richtingen in de leidingstrengen tussen de knooppunten;
 - * het berekenen van de instroomwaarden naar regionale (hoofd-) leidingnetten en naar het leveringsniveau, afhankelijk van:
 - . de totale tijdsvariabele afnameverdeling binnen het beschouwde net, inclusief de doorleveringen naar aangesloten andere netten;

- . de transportcapaciteit van de hoofdleidingen in het voorgaande niveau, het drukverschil tussen de aansluitpunten en de capaciteit van de instroomleidingen, rekening houdend met de onderlinge beïnvloeding van de verschillende hiërarchische deelgebieden;
- * het rekening houden met de volgende drukverschillen:
 - . weerstandsverliezen als gevolg van wandwrijving,
 - . vertragingverliezen als gevolg van appendages,
 - . impulsverschillen als gevolg van versnellingen en vertragingen van de waterstromen,
 - . statische drukhoogteverschillen (in heuvelachtige gebieden),
 een en ander met toepassing van correctiemogelijkheden op de weerstandswaarden ten gevolge van plaatselijke corrosie en wandaangroei. De bijzondere problematiek van de vaak zeer geringe grootte van de drukverschillen is hierbij essentieel!
- het model moet netschema's kunnen vereenvoudigen (berekenen van vervangende weerstanden voor samengevoegde parallelle en/of in serie liggende leidingen).
- het model moet WATERKWALITEITSASPECTEN kunnen berekenen, vooral op het leveringsniveau, zoals:
- * de reis- en verblijftijden en van de mogelijke stromingstrajecten:
 - . de spreiding van de reistijden,
 - . de selectie van relevante reistijden,
 - . de maximumreistijd met bijbehorende fracties en stromingstrajecten,
 - . de maximumverblijftijd in stagnatie- en pendelgebieden,
 - . de herkomstbepaling per afnameknoop van de instroom;
- * het troebelingsverloop;
- het moet een (geautomatiseerde) bedrijfsvoering (met regelkringen) kunnen simuleren;
- het moet calamiteiten kunnen simuleren, mede ter controle van de leveringszekerheid;

- het moet uitkomsten kunnen PRESENTEREN van de waarden van de (tijdsafhankelijke) grootheden:

* per geselecteerd tijdstip:

- . stroomsterkten en -richtingen,
- . drukhoogten en -verliezen,
- . stagnatie- en pendelzones,
- . verblijftijden (ook cumulatief) voor het gehele traject,

* per geselecteerde knoop:

- . de spreiding van de reistijden,
- . de trajecten met stroomrichtingen en -sterkten,
- . drukhoogten en -verliezen,
- . verblijftijden (ook cumulatief);

een en ander:

* alfa numeriek in tabellen,

* grafisch in diagrammen;

het systeem moet toepasbaar zijn voor een presentatie van de uitkomsten in topografisch georiënteerde netschema's.

Onder modelleren is te verstaan het opstellen van mathematische beschrijvingen van een concreet systeem, gebaseerd op de toepassing van theorieën en wetmatigheden.

In het geval van stromingen door (complexe) drinkwater distributienetten zijn dit vooral de hydraulica-theorieën, gecombineerd met schematisaties van leidingnetten, met pompstations en reservoirs en statistische beschouwingen aangaande de verbruiken in over het net verspreide afnamepunten.

Na een algemene beschouwing wordt in dit hoofdstuk ingegaan op de afleiding van de stromingsvergelijkingen die het hydraulische proces beschrijven. Aan de hand van een hypothetisch testnet wordt een en ander geïllustreerd. Dan volgt een omschrijving van enige detailaspecten, waarna de oplossing van het stelsel vergelijkingen wordt behandeld.

In de volgende paragraaf wordt ingegaan op methoden om de reekentijden te verkleinen. Tot slot worden de identificeerbaarheid van het rekenmodel en het modelleren van de kwaliteitsaspecten belicht. De kwaliteitsaspecten betreffen de bepalingen van de reistijden, stromingstrajecten, herkomsten van het afgenomen water en het kwaliteitsverloop over de gevolgde stromingstrajecten.

Voor de gebruikte symbolen wordt verwezen naar bijlage 2.

II.1 ALGEMEEN

Bij het modelleren zijn verschillende abstractieniveaus van beschrijvingen te onderkennen, namelijk:

- de werkelijkheid
- het fysisch model
- de mathematisch beschreven modelvergelijkingen
- het computerprogramma.

De twee laatstgenoemde niveaus en de bijbehorende netschematisaties vormen het rekenmodel.

De graad van abstractie is het laagst bij "de werkelijkheid" en het hoogst bij de "mathematische beschrijving". De laatste stap

naar het computerprogramma is een omzetting naar een (hogere) programmeertaal. Het verhogen van de abstractiegraad kan gepaard gaan met verwaarlozingen en vereenvoudigingen. Steeds zullen afwegingen gemaakt dienen te worden tussen enerzijds de mate van volledigheid en complexiteit en anderzijds het informatieverlies. Het gaat hierbij om een optimalisatie van genoemde aspecten waarbij de berekeningsresultaten voldoende nauwkeurig moeten zijn en binnen acceptabele rekentijden moeten worden verkregen.

De werkelijkheid

De werkelijkheid (het eerste niveau) van een transport- of distributiesysteem bestaat uit vele elementen zoals pompen, watertorens, reservoirs, leidingen inclusief regelcomponenten, appendages en dergelijke.

Als basis voor een leidingnet dienen de leidingenbeheerkaarten, die doorgaans zijn gepresenteerd op analoge kaartbladen. Afhankelijk van de schaalgrootte van deze kaarten is omtrent gegevens in details meer of minder informatie te vinden.

Het totaal is als een systeem volgens een bepaalde structuur met elkaar verbonden tot één functionerend geheel.

Splitsen van het totaal in subsystemen, die volgens relaties met elkaar zijn verbonden, kan voor bepaalde beschouwingen nodig zijn.

Het fysisch model

In het fysisch model (het tweede niveau) zijn de elementen als ideaal beschouwd. Ook worden hier de verwaarlozingen, vereenvoudigingen en (eventueel) schattingen van verbruiken en wandruwheidscoëfficiënten van de buizen en dergelijke ingevoerd. Deze zullen voor ieder "inzoomniveau" (van primair tot leveringsniveau) anders beoordeeld worden.

Verschillende verbruikersvarianten en mogelijke instroomsituaties, zoals direct door pompen of indirect met gemeten volume- stromen, worden beschreven.

De beschrijvende modelvergelijkingen

Het derde niveau geeft de beschrijvende differentiaalvergelijkingen die in dit hoofdstuk worden afgeleid. Deze worden in matrix-vorm gepresenteerd. Omdat wordt uitgegaan van continue functies, is de opzet in principe geheel analytisch. De oplossing van de matrix-vergelijkingen is echter alleen op numerieke wijze mogelijk.

Een belangrijk facet bij het oplossen is hoe de rekentijdstap-grootte, die afhankelijk is van de verschillende optredende (deel)processen en de hiërarchische niveaus, wordt gekozen. Door de continue opzet is de keuze van de rekentijdstapgrootte vrij! Hetgeen juist voor het modelleren van de kwaliteitseffecten op leveringsniveau belangrijk is.

Het computerprogramma

Op basis van de in dit hoofdstuk te behandelen wiskundige beschrijvingen voor stromingen en drukken in een net is het basis hoofdprogramma DYNA ontwikkeld en voor kwaliteitsmodellering het facultatieve hoofdprogramma QUALI, dat gebruik maakt van DYNA. Samen vormen deze programma's de belangrijkste onderdelen van het rekenmodel DYNASIM. De theoriebehandeling is zo opgezet, dat gestreefd is naar het aangeven van de hoofdlijnen. Raakpunten met het programma worden genoemd. De opzet van het programma DYNASIM wordt in hoofdstuk III behandeld.

II.2 DE MODELVERGELIJKINGEN

Een waterleidingnetwerk wordt geschematiseerd tot buizen en knopen. Dit kan zowel een vermaasd als een vertakt netwerk zijn. In knopen, waar de buizen samenkomen, zijn onder andere de afnamen geconcentreerd en de instromen via pompen of bekende volumestromen. Aldus ontstaat een systeem met afname-, instroom- en buffer-elementen (knopen), verbonden door stromingselementen (buizen). De onbekende variabelen die het hydraulische proces beschrijven, zijn de volumestromen in de buizen, de heersende drukken in de knopen en de waterstanden in de buffers.

De vergelijkingen waarmee deze onbekenden worden berekend, zijn:

- beschrijvende elementsvergelijkingen voor de stroming in buizen, de pompen en de reservoirs;
- beschrijvende configuratievergelijkingen voor de stroming door de mazen, de balans in de knopen en de relaties tussen de peilen in de buffers.

Ordering van deze vergelijkingen geeft de toestandsvergelijkingen in matrixvorm.

Bij de afleiding van de beschrijvende vergelijkingen zijn de volgende veronderstellingen gedaan:

- het leidingnet is een volkomen niet-elastisch geheel en is volledig gevuld met water;
- er treden geen lekverliezen op;
- reservoirs en watertorens, in het vervolg buffers genoemd, bufferen het verschil tussen instroom en afname en zijn te karakteriseren als bijzondere knopen;
- water is volkomen onsamendrukbaar, de soortelijke massa is constant;
- de stromingen in de buizen zijn als één-dimensionaal te beschouwen en radiaal-symmetrisch;
- waterslageffecten kunnen buiten beschouwing worden gelaten omdat hiervoor de nodige voorzieningen in een net zijn opgenomen (watertorens, windketels en dergelijke). De tijdseffecten van waterslag zijn dermate klein dat zij hier niet worden beschouwd.

II.2.1 De elementsvergelijkingen

Achtereenvolgens worden behandeld:

- de stromingen in een buis;
- de opslag in een buffer;
- de stromingen opgewekt door pompen.

Stroming in een buis

Voor de afleiding van het totale drukverschil over een leiding kan de zogenaamde balansvergelijking voor impuls dienen (lit. 7). Met

deze vergelijking zijn de energieomzettingen aan te geven die in een stromend medium kunnen plaatsvinden.

De impulsvergelijking in cylindercoördinaten uitgeschreven voor de één-dimensionale stroming, luidt: (fig. 6).

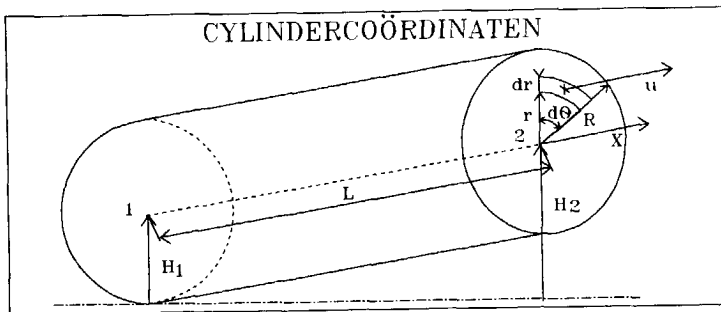


fig. 6 Cylindercoördinaten van een vloeistofdeeltje in buis.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P(x)}{\rho} + gH \right) + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)$$

De plaats en tijdsafhankelijke snelheid u van een vloeistofdeeltje wordt beïnvloed door de druk P , de statische drukhoogte H en de wrijving.

Bij de laatste term speelt de kinematische viscositeit ν een rol.

Het verband tussen ν en de dynamische viscositeit η is: $\nu = \frac{\eta}{\rho}$

Voor drinkwater wordt aangenomen dat de soortelijke massa constant is, namelijk $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, waardoor ook met volumestromen in plaats van massastromen mag worden gewerkt.

Voor een onsamendrukbaar medium is volgens de continuïteitsvergelijking:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

Uit symmetrieoverwegingen voor de buisstroming is $\frac{\partial u}{\partial \theta} = 0$.

Dit geeft een vereenvoudiging van de impulsvergelijking tot:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{d}{dx} (P + \rho gH) + \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right)$$

De wrijvingsterm kan ook anders geschreven worden, zodat:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{d}{dx} (P + \rho gH) + \frac{\eta}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right)$$

Volgens de hydraulica wetten die voor een Newtons medium als drinkwater gelden, is er een evenredig verband tussen de schuifspanning τ en de snelheidsgradiënt $\frac{\partial u}{\partial r}$. Hierbij is η_{tot} de evenredigheidsconstante volgens:

$$\tau = - \eta_{tot} \frac{\partial u}{\partial r} \quad \text{waarbij} \quad \eta_{tot} = \eta_{lam} + \eta_{turb} \quad \text{met} \quad \eta_{turb} \gg \eta_{lam}$$

Hiermee wordt de impulsvergelijking:

$$\rho r \frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{d}{dx} (P + \rho gH) r - \frac{\partial \tau r}{\partial r}$$

Voor het drukverschil over een buis met lengte L moet deze uitdrukking tweemaal geïntegreerd worden, namelijk over het oppervlak van de buisdoorsnede in r-richting en vervolgens over de lengte L in x-richting:

$$2\pi \int_{r=0}^R \rho r \frac{\partial u}{\partial t} dr = - 2\pi \int_{r=0}^R \frac{d}{dx} (P + \rho gH) r dr - 2\pi \int_{r=0}^R \frac{\partial (\tau r)}{\partial r} dr$$

Met de buisoppervlakte $A = \int_{r=0}^R 2\pi r dr$, wordt dit:

$$\rho A \frac{dV}{dt} = - A \frac{d}{dx} (P + \rho gH) - 2\pi R \tau_0$$

Hierin is V de gemiddelde snelheid volgens:

$$V = \frac{2\pi \int_{r=0}^R u r dr}{A}$$

De wandschuifspanning τ_0 (een functie van R) is sterk afhankelijk van de wandhoedanigheid en is uitgedrukt in de wandruweheidsfactor k.

Integreren we deze uitdrukking over de lengte dan:

$$\int_{x=0}^L dx \rho A \frac{dV}{dt} = \int_{x=0}^L - A \frac{d}{dx} (P + \rho gH) dx - 2\pi R \tau_0 \int_{x=0}^L dx$$

Of:

$$\rho A L \frac{dV}{dt} = - A (\Delta P + \rho g \Delta H) - 2\pi R L \tau_0$$

Delen door A geeft expliciet het drukverschil over de buislengte.

$$|\Delta P| = - \Delta P = \frac{2\pi R L \tau_0}{A} + \rho g \Delta H + \rho L \frac{dV}{dt}$$

wand-
druk-
impuls
wrijving
hoogte

Met $\Delta P = P_2 - P_1$ en $\Delta H = H_2 - H_1$ volgens fig. 6.

Het totale drukverschil is hiermee de optelling van de wandeffecten, het statische drukhoogteverschil en de drukverschillen ten gevolge van sterke veranderingen in snelheid van de massastroom

(impulseffecten die kunnen domineren op leveringsniveau). Hierbij zijn de wandeffecten als energieverlies (drukverlies) te beschouwen (kinetische energie naar warmte), terwijl de twee andere termen omkeerbare omzettingen zijn.

Voor de wandwrijvingsverliezen kan met Darcy-Weisbach (lit. 7), een evenredig verband tussen de wandschuifspanning en het kwadraat van de (ongestoorde) gemiddelde snelheid in een buis geschreven worden volgens:

$$\tau_0 \propto \frac{1}{2} \rho V^2$$

Of in volumestroom:

$$\tau_0 \propto \varphi^2$$

zodat voor het wandwrijvingsverlies geldt:

$$\Delta P_w = R_w \varphi^2$$

In de literatuur (lit. 7,8 en 9) zijn (vele) empirische formules bekend voor de wandweerstandswaarde R_w . Een veel gebruikte formule (ook hier) is die volgens White-Colebrook voor turbulente stroming met het Reynoldsgetal $Re = \frac{V D}{\nu} > 2300$.

Voor de wandwrijvingscoëfficiënt λ en voor R_w gelden:

$$\lambda = \frac{0,25}{\log^2 \left[\frac{1}{0,4 Re \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,7 D} \right]}$$

$$R_w = \frac{8 \lambda \rho L}{\pi^2 D^5}$$

Op deze wijze wordt de waarde R_w uit de wandruwheid k bepaald voor een bepaalde stromingssituatie (dus voor een Re -getal).

Een (klein) nadeel van deze formule is dat λ in impliciete vorm gegeven is. Dit maakt een subroutine (WREKEN) nodig om λ en daaruit vervolgens R_w te bepalen.

Indien de stroming laminair is ($Re < 2300$), geldt het lineaire verband volgens:

$$\Delta P_w = R_w \varphi$$

Waarin $R_w = \frac{128 \nu \rho L}{\pi D^4}$, hierin is $\lambda = \frac{64}{Re}$ reeds verwerkt!

Beide stromingssituaties kunnen gelijktijdig op verschillende plaatsen in het net voorkomen!

Fig. 7 toont het Moody diagram zoals dit geldt voor zowel laminaire als turbulente buisstroming. De waarde λ staat hier als functie van het Re-getal en van de buisgegevens D/k .

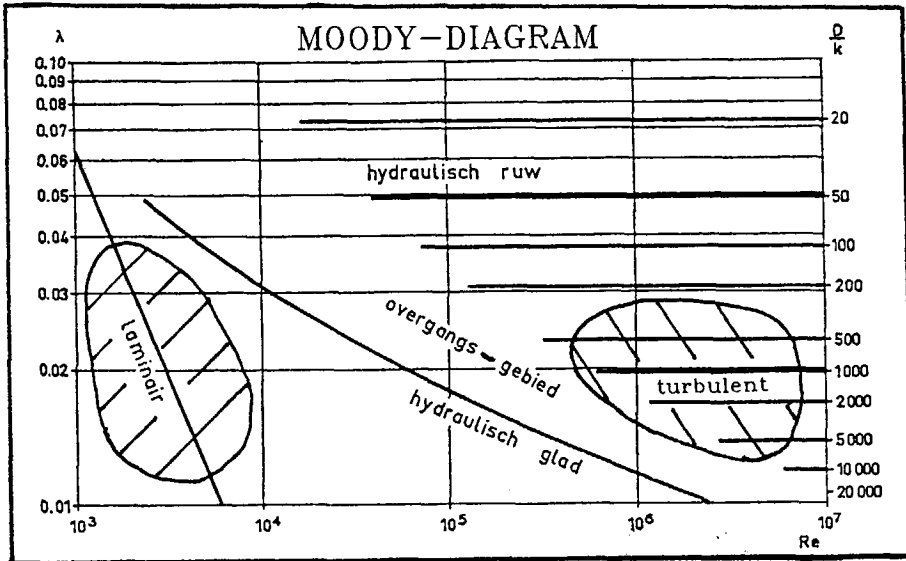


fig. 7 Het Moody diagram met hierin aangegeven de voorkomende stromingssituaties (bron lit. 9).

Een distributienet bestaat echter niet uitsluitend uit rechte buiselementen. Voor bochten, afsluiters en andere appendages moeten hiervoor additionele drukverliezen opgeteld worden.

In de literatuur worden deze veelal aangeduid als zogenaamde "vertragingsverliezen".

Ook deze verliezen worden afhankelijk van de gemiddelde snelheid uitgedrukt, waarbij gebruik wordt gemaakt van de evenredigheidsfactor ζ volgens:

$$\Delta P_{\text{add}} = \frac{1}{2} \zeta \rho V^2$$

De waarde van ζ wordt in de literatuur gegeven.

Dit drukverlies kan ook weer evenredig met het kwadraat van de volumestroom worden geschreven als:

$$\Delta P_{\text{add}} = \zeta K \varphi^2 \qquad K = \frac{8\rho}{\pi^2 D^4}$$

Ook is de impulsterm anders te schrijven; met: $\dot{\varphi} = \frac{dVA}{dt}$

kan dit als volgt geschreven worden: $\rho L \frac{dV}{dt} = \frac{\rho L}{A} \dot{\varphi} = I \dot{\varphi}$

Hierin is I de hydraulische inertantieterm. Fysisch gezien is deze evenredigheidsconstante een maat voor de traagheid van stromende watermassa's in een buis en als zodanig een maat voor de buffering van impuls. Voor een turbulente buisstroming kan het totale drukverschil over een buislengte L als volgt geschreven worden:

$$\Delta P = R_w \varphi^2 + \sum_{i=1}^n (\zeta K \varphi^2)_i + \rho g \Delta H + I \dot{\varphi}$$

met n het aantal mogelijke vertragingsverliezen in een buis. De term $(\zeta K \varphi^2)_i$ is het i' vertragingsverlies.

Bij een laminaire stroming zijn de kwadratische termen van de buisstromen lineair.

Om de rol van de afzonderlijke termen van deze vergelijking tot uitdrukking te laten komen, is het hiërarchische niveau van een deelnetwerk van belang. De dominantie van de weerstands- of van de impulsterm wordt bepaald door het beschouwde hiërarchisch niveau van het net en de grootte van de gemiddelde snelheid en de fluctuaties.

Uit aftastende berekeningen is gebleken dat op "primair niveau" de wandwrijvingsterm overheerst, terwijl op het "leveringsniveau" de inertantie- of impulsterm van bepalende invloed kan zijn (dit wordt in hoofdstuk IV getest). Het stromingsgedrag op leveringsniveau is namelijk sterk fluctuerend als direct gevolg van het fluctuerende afnamepatroon.

De opslag in een buffer

Doordat in een leidingnet de totale in- en uitstromende volumestromen ongelijk aan elkaar kunnen zijn, vindt ter plaatse van een buffer een (netto)levering aan of onttrekking uit het net plaats. Dergelijke knooppunten waarin buffers aanwezig zijn, zijn wiskundig gezien zogenaamde "integratoren". Voor dergelijke processen geldt volgens de continuïteitsvergelijking:

$$\text{Instroom} - \text{Uitstroom} = \text{Buffering}$$

Voor een tijdstap dt zal de hoogtevariatie dH zijn (fig. 8).

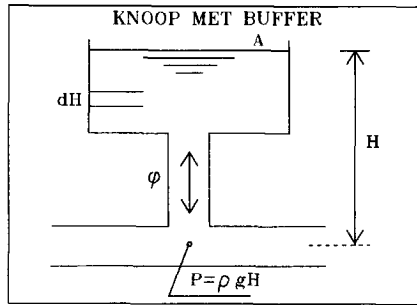


fig. 8 Verband hoogte en druk in buffer.

Voor het geval dat de integrator zich vult geldt dan:

$$\varphi_{\text{netto}} = \varphi_{\text{in}} - \varphi_{\text{uit}} = A \frac{dH}{dt}$$

Hierin is A de gemiddelde oppervlakte van de buffer.

Het lineaire verband tussen druk en hoogte ter plaatse van de buffer is: $P = \rho g H$

Hiermee is
$$\frac{dP}{dt} = \rho g \frac{dH}{dt}$$

waaruit volgt dat
$$\varphi = \frac{A}{\rho g} \dot{P}$$

Met $C = \frac{A}{\rho g}$ als de capaciteit van de buffer wordt dit $\dot{P} = \frac{\varphi}{C}$

De stromingen opgewekt door pompen

Indien de instroom via een pomp plaatsvindt, is de pompkarakteristiek van belang (fig. 9).

Er geldt: $\varphi = G(P - P_0)$

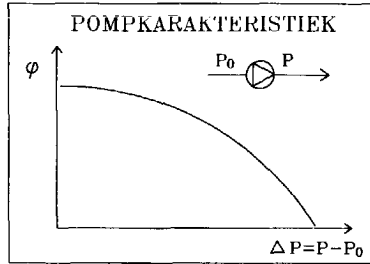


fig. 9 Verband tussen druk en levering.

Hierin is ΔP de opvoerhoogte en G het verband tussen de stroming en de opvoerhoogte.

De plaats van de pomp ten opzichte van de systeemgrenzen is van belang.

Te onderscheiden zijn drie mogelijkheden:

- pompen (ver) buiten de systeemgrens;
- pompen op de systeemgrens;
- pompen binnen de systeemgrens.

Pompen (ver) buiten de systeemgrens (fig. 10)

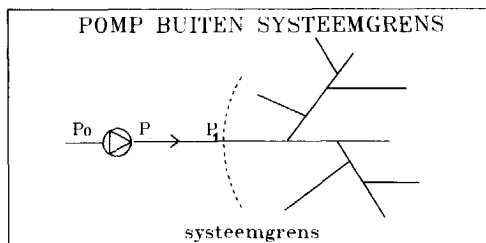


fig. 10 Drukken bij pomp buiten systeemgrens.

De volumestroom φ zal in de regel gemeten worden in combinatie met de heersende druk P_1 aan de systeemgrens, de pompkarakteristiek is dan niet van belang.

Pompen op de systeemgrens (fig. 11)

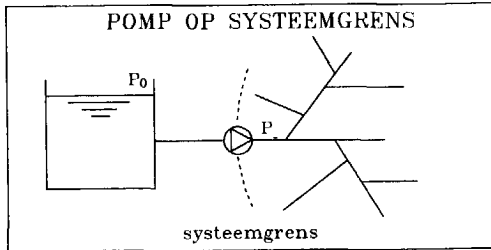


fig. 11 Drukken bij pomp op systeemgrens.

De voordruk P_0 is bepaald door het niveau in het reservoir waaruit de pomp water onttrekt. Deze zal bekend zijn aan de hand van metingen van het waterniveau. De persdruk P is afhankelijk van de stromingstoestand in het net en van de voordruk. De pompkarakteristiek bepaalt de stromingssituatie aan de systeemgrens.

Pompen binnen de systeemgrens (fig. 12)

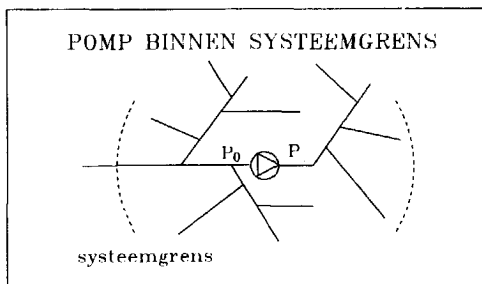


fig. 12 Drukken bij pomp binnen systeemgrens.

Hier vallen aanjagers (of boosters) onder. Deze zouden geplaatst kunnen zijn op regionaal en/of op leveringsniveau met als doel voldoende snelheid in de buizen of voldoende druk te onderhouden.

II.2.2 De configuratie-vergelijkingen

We onderscheiden:

- stromingsbalans over een knooppunt;
- drukbalans over een gesloten maas;
- relatie tussen buffers.

Stromingsbalans over een knooppunt

Voor een knooppunt geldt volgens de 1^e wet van Kirchhoff dat: de som van de toevoerende volumestromen gelijk is aan de som van de afvoerende volumestromen en de afname in dit knooppunt (fig. 13).

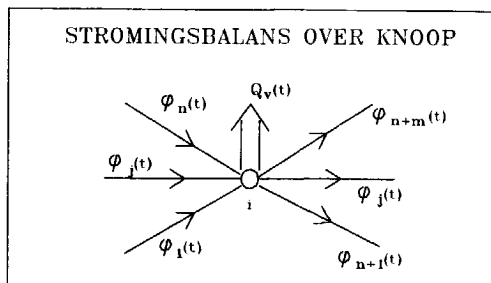


fig. 13 Volumestromen voor knoop i.

De continuïteitsvergelijking uitgeschreven luidt:

$$\sum_{j=1}^n \varphi_j(t) = Q_v(t) + \sum_{j=n+1}^{n+m} \varphi_j(t)$$

hierin zijn φ_j met $j=1, \dots, n$, de toestromende volumestromen naar knoop i en φ_j met $j=(n+1), \dots, (n+m)$ de afvoerende volumestromen.

De geconcentreerde afname op knoop i is $Q_v(t)$.

Drukbalans over een gesloten maas

Uit de continuïteitsvergelijking voor een gesloten maas geldt volgens de 2^e wet van Kirchoff dat het totale drukverlies over de afzonderlijke buizen die een gesloten maas vormen, gelijk is aan nul (fig. 14).

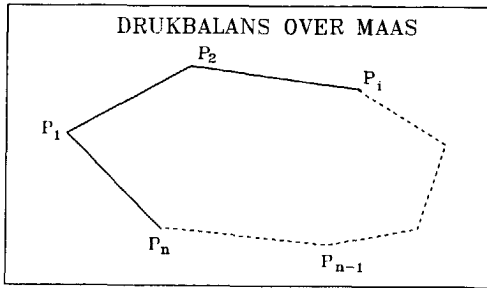


fig. 14 Drukverschil over maas is nul.

Uitgeschreven luidt de maasvergelijking:

$$(P_2 - P_1) + \dots + (P_n - P_{n-1}) + (P_1 - P_n) = 0$$

Ofwel:

$$\sum_{i=1}^{n-1} (P_{i+1} - P_i) + (P_1 - P_n) = 0$$

(in de gesloten maas zijn n knopen opgenomen).

Relatie tussen buffers

Zijn in een net w buffers opgenomen dan zijn er $(w-1)$ onafhankelijke relaties te geven tussen de buffers.

Langs willekeurige wegen tussen twee buffers is het drukverschil dan als volgt (fig. 15).

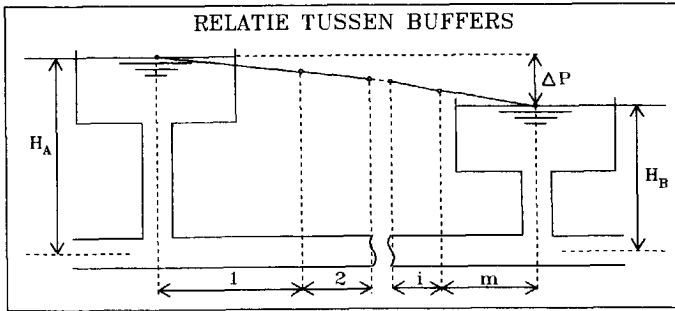


fig. 15 Onderling verbonden buffers.

Het drukverlies ΔP tussen beide buffers is:

$$\Delta P = H_A - H_B = \sum_{i=1}^m \Delta P_i$$

waarin het aantal buizen tussen de twee buffers m bedraagt.

Een speciale situatie doet zich voor wanneer in een buffer een overstort aanwezig is, zoals fig. 16 laat zien.

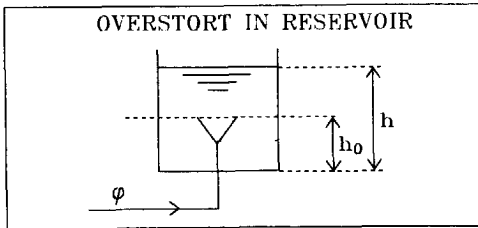


fig. 16 Overstorthoogte h_0 .

Voor het waterniveau $h > h_0$ geldt bovenstaande uitdrukking.

Voor $h \leq h_0$ blijft h_0 de tegendrukhoogte voor de toestromende volumestroom.

Opmerking

Er bestaat een éénduidig verband tussen het aantal knopen n_{kno} , het aantal buizen n_{bui} en het aantal mazen n_{ma} volgens:

$$n_{ma} = (n_{bui} - n_{kno}) + 1$$

Deze vergelijking dient ter geometrische controle.

II.2.3 De toestandsvergelijkingen

Met de hiervoor beschreven element- en configuratievergelijkingen is het hydraulisch proces in een transport- en distributienet volledig vastgelegd.

Ordering van deze vergelijkingen leidt tot de volgende twee matrixvergelijkingen (lit. 10):

- differentiaalvergelijking I;
- vergelijking II.

De differentiaalvergelijking I

De dynamica van de toestand wordt beschreven volgens:

$$A\dot{\bar{X}} = G\bar{X} + H(\bar{X})\bar{X}^2 + \bar{B} + \bar{C} \quad I$$

hierin is \bar{X} de toestandsvector die bestaat uit elementen met bufferdrukken Pw_i (met $i=1, \dots, m$) en de elementen van de volumestromen φ_j (met $j=1, \dots, n$) in alle buizen.

$$\bar{X} = (Pw_1, Pw_2, \dots, Pw_m, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n)$$

Hier is m het aantal bufferdrukken en n het aantal buisstromen.

Vergelijking II

Hiermee kunnen de drukken in de knopen worden berekend volgens:

$$\bar{P} = D(\bar{X})\bar{X}^2 + E\dot{\bar{X}} + \bar{F} \quad II$$

In vergelijking I zijn A, G en $H(\bar{X})$ vierkante matrices met dimensie $(n_{wa} + n_{bui})$, waarbij bovendien $H(\bar{X})$ toestandsafhankelijk is. $D(\bar{X})$ en E in vergelijking II zijn matrices met dimensie $[n_{kno} * (n_{wa} + n_{bui})]$, waarin $D(\bar{X})$ weer toestandsafhankelijk is.

Verder zijn:

\bar{B} de vector voor de instromen;	dimensie $(n_{wa} + n_{bui})$
\bar{C} de vector voor de afnamen op de knopen;	, ,
\bar{F} de vector voor de bufferdrukken;	dimensie n_{kno}
\bar{P} de vector voor de drukken in de knopen.	, ,

In verband met de nauwkeurigheid van berekeningsresultaten is het essentieel dat eerst de bufferdrukken en stromingen met vergelijking I worden bepaald, waarna uit de stromingen met vergelijking II de drukken worden berekend.

Indien er geen buffering in een net aanwezig is, moet één drukmeetpunt als referentiedruk dienen. Met dit drukmeetpunt worden dan de overige drukken in de knopen bepaald.

Opmerkingen

Vergelijking I is een niet-lineaire differentiaalvergelijking van de eerste orde en in impliciete vorm omdat matrix A singulier is (de inverse A^{-1} bestaat niet).

De kwadratische term van de toestandsvector \bar{X} in vergelijking I betekent dat alle elementen van deze vector gekwadrateerd worden! In principe gaat het hier om de oplossing van een "bepaald" stelsel. Het aantal beschikbare vergelijkingen is gelijk aan het aantal onafhankelijke onbekenden. Dit blijkt uit onderstaande beschouwing.

Voor een netwerk zijn de onafhankelijke onbekenden de n_{bui} buisstromen en de drukken in de n_{wa} watertorens.

Het totaal aantal onbekenden bedraagt dan $(n_{bui} + n_{wa})$.

Het aantal beschikbare vergelijkingen is:

- de knooppuntsvergelijkingen n_{kno} ;
- de maasvergelijkingen $n_{bui} - n_{kno} + 1$;
- de onderlinge buffervergelijkingen $n_{wa} - 1$.

Sommering geeft $n_{bui} + n_{wa}$, waarmee de bepaaldheid is aangetoond. De dimensie van het systeem, of van de toestandsvector, is dus gelijk aan het aantal onafhankelijke onbekenden ($n_{bui} + n_{wa}$).

II.3 ILLUSTRATIE OP EEN TESTNET

Om de toestandsvergelijkingen te illustreren, worden deze nu bepaald voor het eenvoudige hypothetische netwerk volgens fig. 17. Een soortgelijk netwerk wordt eveneens gebruikt bij het uitvoeren van de testberekeningen die behandeld worden in hoofdstuk IV.

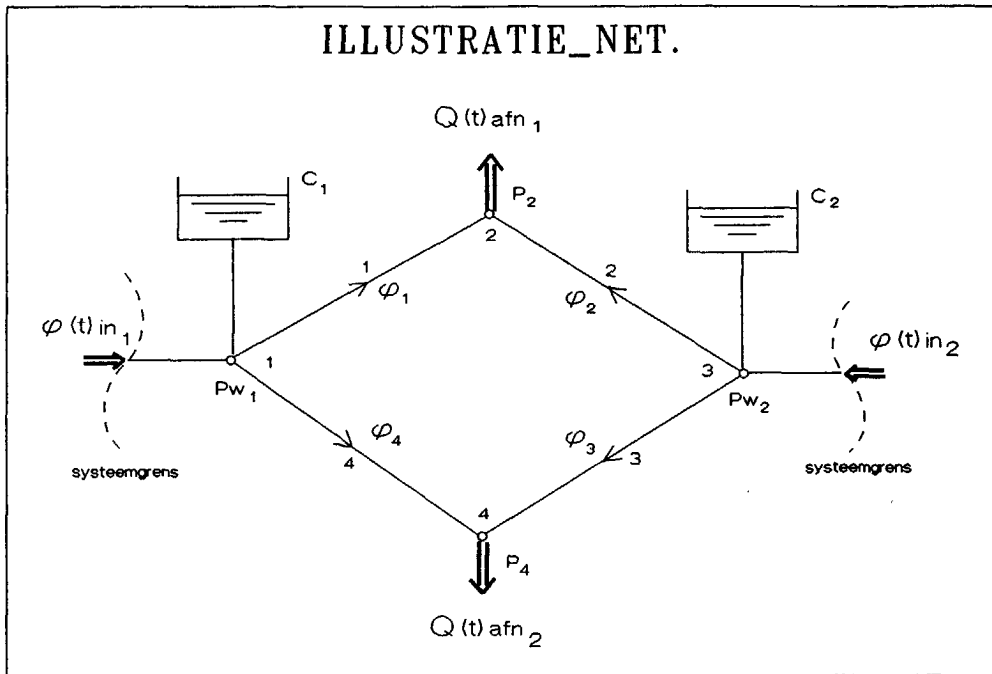


fig. 17 Eenvoudig netwerk ter illustratie.

De pompen zijn hier ver buiten de systeemgrenzen gedacht, zodat de tijdsafhankelijke instromen als gemeten volumestromen $\varphi(t) \text{ in}_1$ en $\varphi(t) \text{ in}_2$ zijn te beschouwen. De drukken in de invoerknoppen

1 en 3 zijn hier de watertoren(buffer)-drukken P_{w_1} en P_{w_2} .
De capaciteiten van de watertorens zijn respectievelijk C_1 en C_2 .

De buizen hebben een lengte L_j , een middellijn D_j , en een wandruwhe:
 k_j . Per buis is er een additionele weerstand als gevolg van een
fictieve appendage, gekarakteriseerd door $(\zeta K)_j$, $j = 1 \dots 4$.

De toestandsvector bestaat uit de twee watertorendrukken en de
vier buisstromen volgens:

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} P_{w_1} \\ P_{w_2} \\ \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \end{bmatrix}$$

De toestandsvector wordt bepaald door (differentiaal)vergelijking
I op te lossen waarmee de stromingen bekend zijn.

Vervolgens wordt vergelijking II met de nu bekende \bar{X} opgelost
zodat de drukken in de knopen zijn bepaald.

Aannemend dat voor de buizen in dit net de stroming turbulent is
en dat er geen hoogteverschillen in het net aanwezig zijn, is
 $\rho g \Delta H = 0$ en gelden de volgende zes vergelijkingen:

1. knoop 2 $Q_{afn_1} = \varphi_1 + \varphi_2$

2. knoop 4 $Q_{afn_2} = \varphi_3 + \varphi_4$

3. knoop 1 $C_1 \dot{P}_{w_1} = \varphi_1 n_1 - \varphi_1 - \varphi_4$

4. knoop 3 $C_2 \dot{P}_{w_2} = \varphi_1 n_2 - \varphi_2 - \varphi_3$

5. de maasvergelijking, voluitgeschreven luidt:

$$I_1 \dot{\varphi}_1 - I_2 \dot{\varphi}_2 + I_3 \dot{\varphi}_3 - I_4 \dot{\varphi}_4 = -(Rw + \zeta K)_1 \varphi_1^2 + (Rw + \zeta K)_2 \varphi_2^2 - (Rw + \zeta K)_3 \varphi_3^2 + (Rw + \zeta K)_4 \varphi_4^2$$

6. voor de onderlinge watertorenvergelijking wordt het pad over knoop 2 gekozen.

$$P_{w_1} - P_{w_2} = (Rw + \zeta K)_1 \phi_1^2 + I_1 \dot{\phi}_1 - (Rw + \zeta K)_2 \phi_2^2 - I_2 \dot{\phi}_2$$

Of gesorteerd met termen waarin de afgeleiden in het linkerlid staan:

$$I_1 \dot{\phi}_1 - I_2 \dot{\phi}_2 = P_{w_1} - P_{w_2} - (Rw + \zeta K)_1 \phi_1^2 + (Rw + \zeta K)_2 \phi_2^2$$

(Differentiaal)vergelijking I voluitgeschreven luidt dan:

$$\begin{array}{c}
 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_1 - I_2 & I_3 - I_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_1 - I_2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{P}_{w_1} \\ \dot{P}_{w_2} \\ \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \dot{\phi}_3 \\ \dot{\phi}_4 \end{bmatrix} \\
 \\
 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{w_1} \\ P_{w_2} \\ \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \end{bmatrix} \\
 \\
 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 - Rt_1 & Rt_2 - Rt_3 - Rt_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -Rt_1 & Rt_2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{w_1} \\ P_{w_2} \\ \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \end{bmatrix} \\
 \\
 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \phi(t)_{jn1} \\ \phi(t)_{jn2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 \\
 \begin{bmatrix} -Q(t)_{kfn1} \\ -Q(t)_{kfn2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{array}$$

A
G
H
B
C

Hierin is de totale weerstandsterm $Rt = Rw + \zeta K$

In matrixvorm: $\dot{A}\bar{X} = G\bar{X} + H(\bar{X})\bar{X}^2 + \bar{B} + \bar{C}$

De vergelijkingen ter bepaling van de drukkén in de knopen luiden:

$$P_1 = P_{w_1}$$

$$P_2 = P_{w_2} - (Rw + \zeta K)_2 \phi_2^2 - I_2 \dot{\phi}_2$$

$$P_3 = P_{w_2}$$

$$P_4 = P_{w_1} - (Rw + \zeta K)_4 \phi_4^2 - I_4 \dot{\phi}_4$$

Vergelijking II voluitgeschreven luidt:

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -Rt_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Rt_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Pw_1 \\ Pw_2 \\ \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \end{bmatrix}^2 + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -I_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Pw_1 \\ Pw_2 \\ \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Pw_1 \\ Pw_2 \\ Pw_2 \\ Pw_1 \end{bmatrix}$$

D
E
F

In matrixvorm: $\bar{P} = D(\bar{X}) \bar{X}^2 + E \bar{X} + \bar{F}$

II.4 MATRICES, TRANSFORMATIES EN CONTINUITEIT

In deze paragraaf wordt, onder andere, de opbouw van de matrices toegelicht, evenals de matrixtransformaties met als doel vereenvoudiging en rekentijdverkortung. Ook wordt het gebruik van splines ter verkrijging van continue functies behandeld.

II.4.1 De structuur van de matrices

Analyse van vergelijking I geeft qua opbouw van de matrices de volgende structuur.

In matrixnotatie:

$$\begin{array}{l}
 \text{-----} \\
 \text{knooppunts-} \\
 \text{vergelijkingen} \\
 \text{-----} \\
 \text{maas-} \\
 \text{vergelijkingen} \\
 \text{-----} \\
 \text{onderlinge buffer-} \\
 \text{vergelijkingen} \\
 \text{-----}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \updownarrow n_{kno} \\
 \updownarrow n_{kno} - n_{wa} \\
 \updownarrow n_{wa} \\
 \updownarrow n_{bui} - n_{kno} + 1 \\
 \updownarrow n_{wa} - 1
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ A_{21} & 0 \\ 0 & A_{32} \\ 0 & A_{42} \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} 0 & G_{12} \\ 0 & G_{22} \\ 0 & 0 \\ G_{41} & 0 \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & H_{32} \\ 0 & H_{42} \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \begin{matrix} n_{wa} & n_{bui} \\ \leftrightarrow & \leftrightarrow \end{matrix} \\
 \bar{X} = \bar{X} + \bar{X} + \bar{X} + \bar{X} + \bar{X} \\
 A \qquad G \qquad H \qquad B \qquad C
 \end{array}$$

Voor de opbouw van de matrices gelden onderstaande opmerkingen:

- in de afzonderlijke vergelijkingen komen de watertorendrukken niet in het kwadraat voor, waardoor in de eerste kolommen van matrix $H(\bar{X})$ alleen nul-elementen staan;
- in de knooppuntsvergelijkingen komen geen afgeleiden en geen kwadraten van de buisstromen voor, zodat A_{12} en A_{22} nulmatrices zijn alsmede H_{12} en H_{22} ;
- voor de watertorenknopen komen in de vergelijkingen de afgeleiden van de torendrukken voor; indien nu eerst de knooppuntsvergelijkingen voor de knopen zonder buffer en vervolgens de vergelijkingen voor de knopen waarin een buffer is gesitueerd worden opgesteld, dan staan in deelmatrix A_{21} de capaciteiten van de buffers op de hoofddiagonaal. De overige elementen van deze deelmatrix zijn nul-elementen;
- op de eerste n_{kno} plaatsen van B en C kunnen respectievelijk de instromen en de afnamen komen te staan. De overige elementen zijn nul-elementen;
- in de maasvergelijkingen komen geen watertorendrukken en geen afgeleiden van deze drukken voor, dit betekent nullen in de matrices A_{31} en G_{31} .
Omdat er geen volumestromen zijn in de maasvergelijkingen, zijn de elementen in matrix G nul-elementen;
- in de onderlinge buffervergelijkingen komen geen afgeleiden van de drukken en geen buisstromen voor, zodat ook op deze plaatsen nul-elementen voorkomen.

II.4.2 De transformatie van matrices

Zoals in de vergelijkingen I en II te constateren is, komen matrices voor die wel en niet toestandsafhankelijk zijn, namelijk:

- in vergelijking I bestaan A en G uit constanten, terwijl matrix H uit elementen bestaat die gelijk zijn aan de weerstandstermen. Deze termen zijn stromings-, dus toestandsafhankelijk!
- in vergelijking II bestaat matrix E weer uit constanten, terwijl D weer de weerstandstermen bevat. Matrix D is dus ook toestandsafhankelijk.

Voor de bepaling van de toestandsafhankelijke matrices, zouden voor iedere stromingstoestand de bijbehorende weerstandswaarden bepaald moeten worden. Een en ander is afhankelijk van het Regetal (fig. 7).

Het is echter gewenst (bij het oplossen van vergelijking I) om niet op de elementen van de matrices te moeten differentiëren. Dit wordt bereikt door de matrices toestandsonafhankelijk te maken, zodat deze uitsluitend constante elementen bevatten.

Voor matrix $H(\bar{X})$ is daarom de volgende transformatie uitgevoerd:

$$H(\bar{X}) * \bar{X}^2 \longrightarrow H * R(\bar{X}) * \bar{X}^2 \longrightarrow H * \bar{Y}$$

De op deze wijze ontstane nieuwe matrix H heeft uiteraard dezelfde structuur als $H(\bar{X})$, echter alleen op de plaatsen waar de weerstandsterm zou staan, komt nu in H een ± 1 te staan.

De matrix $R(\bar{X})$ is nu een diagonaalmatrix waarvoor geldt dat:

$R_{ii} = 1$ voor de bufferelementen;

$R_{ii} = (Rw + \zeta K)_i$ voor de buiselementen.

Ter illustratie voor het netwerk volgens fig. 17 geldt:

$$H(\bar{X}) = H * R(\bar{X})$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_1 & R_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_1 & R_2 & -R_3 & R_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_4 \end{bmatrix}$$

En volgens

$$\bar{Y} = R(\bar{X}) * \bar{X}^2$$

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \\ Y_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & R_1(\bar{X}) & & & \\ & & & R_2(\bar{X}) & & \\ & & & & R_3(\bar{X}) & \\ & 0 & & & & R_4(\bar{X}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Pw_1 \\ Pw_2 \\ \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \end{bmatrix}^2 = \begin{bmatrix} Pw_1^2 \\ Pw_2^2 \\ R_1(\bar{X}) \varphi_1^2 \\ R_2(\bar{X}) \varphi_2^2 \\ R_3(\bar{X}) \varphi_3^2 \\ R_4(\bar{X}) \varphi_4^2 \end{bmatrix}$$

Op deze wijze is een produkt ontstaan van een matrix H die bestaat uit constanten, met een vector \bar{Y} die nu bestaat uit kwadratische weerstandstermen. Deze weerstandsvector in algemene vorm voluit geschreven luidt:

$$\bar{Y} = [Pw_1^2, \dots, Pw_n^2, (Rw + \zeta K)_1 \varphi_1^2, \dots, (Rw + \zeta K)_n \varphi_n^2]$$

De waarden van de weerstandselementen van $R(\bar{X})$ zijn de totale weerstanden inclusief vertragingsverliezen. Afhankelijk van de stromingstoestand worden deze via een aparte subroutine WREKEN bepaald.

Voor het oplossen van de toestandsvector is het nodig dat matrix $R(\bar{X})$ differentieerbaar is. Dit wordt bereikt door uit de discrete functiewaarden van de elementen van $R(\bar{X})$, met gebruikmaking van "splines", continu differentieerbare functies te genereren.

Een soortgelijke matrixtransformatie is ook voor $D(\bar{X})$ uitgevoerd.

Opmerking

Voor verkorting van de inleestijd van de matrices wordt een geheel andere transformatie uitgevoerd.

Kenmerkend voor de vergelijkingen is dat de opbouw van matrices nogal zwak bezet is (veel nul- elementen).

Omdat alleen de niet-nul-elementen van belang zijn worden de matrices omgezet in een "3-dimensionale" structuur, zodat deze elementen op directe wijze ingelezen kunnen worden (lit. 11).

Als voorbeeld volgt nu de omzetting van matrix A, zie fig. 18.

$A(i,j) \rightarrow \text{AMATRIX}(i,j,2)$

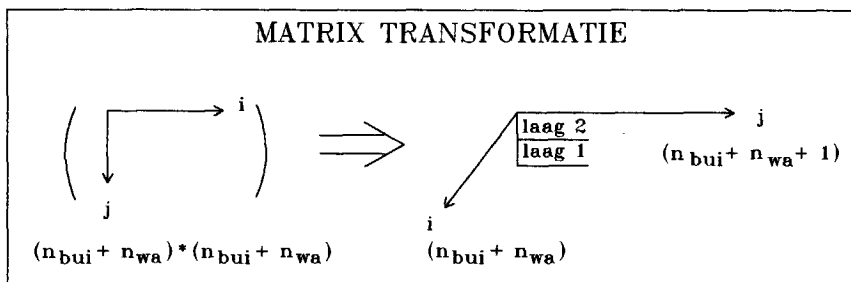


fig. 18 Omzetting "2-dimensionale" naar "3-dimensionale" matrix

$\text{AMATRIX}(i,0,1)$ is van de i° rij van de A matrix, het aantal "niet-nul"-elementen.

In $\text{AMATRIX}(i,j,1)$ loopt j van 1, ..., $\text{AMATRIX}(i,0,1)$.

In de eerste laag van deze nieuwe AMATRIX staan het aantal en de kolomnummers van deze "niet-nul"-elementen.

In de tweede laag staan op plaatsen $(i,j,2)$ met $j=1, \dots, \text{AMATRIX}(i,0,1)$ de bijbehorende waarden.

Stel dat de i° rij van matrix A er als volgt uitziet:

(0 0 0 0 - 1 0 1 1 - 1 0)

Het aantal niet-nul-elementen is dus $k=4$

$\text{AMATRIX}(i,0,1)=4$

De kolomnummers waarop deze niet-nul-elementen zich bevinden zijn 5,7,8 en 9, zodat de 1^e en 2^e laag worden:

AMATRIX	$(i,1,1) = 5$	AMATRIX	$(i,1,2) = -1$	
	$(i,2,1) = 7$		$(i,2,2) = 1$	
	$(i,3,1) = 8$	1 ^e laag	$(i,3,2) = 1$	2 ^e laag
	$(i,4,1) = 9$		$(i,4,2) = -1$	

De nieuwe AMATRIX heeft voor de i^e rij dan de volgende structuur, (fig. 19):

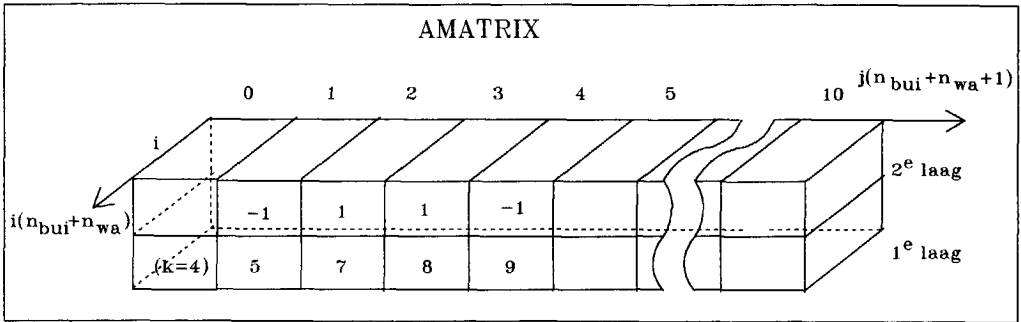


fig. 19 De nieuwe AMATRIX.

II.4.3 Het gebruik van splines

Gemakshalve worden (enkele) punten van de continue functies ingevoerd. Om nu weer van deze discrete functies tot continue differentieerbare functies te komen wordt gebruik gemaakt van splinebenaderingen (lit. 12). Hiervoor gebruikt het programma subroutines, welke afkomstig zijn uit een numerieke bibliotheek. Deze dienen om interpolatiewaarden te vinden voor de discreet ingevoerde functies voor de instromen, de afnamen, de pompkarakteristieken en (vervangende) buisweerstand.

Een conventionele en nog steeds gangbare methode is discrete functies te benaderen door polynomen.

Deze methode heeft het nadeel dat de interpolatiefunctie voor tussenliggende waarden sterker gaat afwijken naarmate het aantal basispunten toeneemt ("doorslingering"). Om dit te voorkomen zou

men een aantal bekende basispunten moeten laten vervallen, hetgeen informatieverlies betekent en daarom ongewenst is.

Vanuit dit nadeel ontstaat de behoefte aan een andere oplossing, waarbij de benaderingsfunctie juist wél gebruik maakt van alle (schaarse) basispunten en bovendien voldoet aan de eisen van continuïteit en differentieerbaarheid.

Meetmogelijkheden zijn in de regel uit praktische overwegingen beperkt, vaak is het zo dat slechts uurwaarden bekend zijn. Het is dus van belang deze informatie optimaal te benutten.

De eenvoudige methode die in dit opzicht beter toegepast kan worden, is de splinebenadering. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een benaderingsfunctie die is samengesteld uit een aantal $n+3$ derdegraadspolynomen (kubische splines) zie fig. 20.

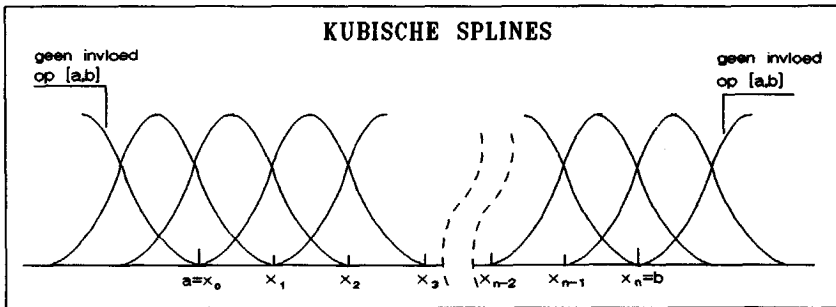


fig. 20 Op interval $[a, b]$ $n+3$ derdegraadspolynomen.

Door de vorm van de gebruikte polynomen en de wijze van aaneenschakelen is de functie die hieruit ontstaat, tot en met de tweede afgeleide continu op het hele beschouwde domein. Deze eis is voldoende voor het gebruik in het programma waarbij slechts de eerste afgeleide nodig is.

Bij de approximatie-functie met splines wordt dus een functie gezocht op interval $[a, b]$ met n basispunten waarvan de functie-waarden bekend zijn.

Als $f(x)$ de werkelijke functie is, dan wordt de benadering van $f(x)$ (ofwel de approximatie-functie) geschreven als:

$$S(x) = \sum_{i=-1}^{n+1} C_i * B_i$$

De approximatie-functie $S(x)$, die continu is op $[a,b]$, is samengesteld uit kubische splines volgens de som van $n+3$ "basisfuncties" vermenigvuldigd met de desbetreffende splinecoëfficiënt C .

De coëfficiënt C moet dus bepaald worden, opdat de functiewaarde kan worden benaderd.

$B_i(x)$ is de basisfunctie. Dit is een deelfunctie die maar op één gedeelte van het totale domein een waarde heeft. Deze allemaal met elkaar verbonden leveren $S(x)$.

De definitie van de basisfunctie is als volgt:

$$B_i(x) = \begin{cases} \frac{(x-x_{i-2})^3}{h^3} & , x_{i-2} \leq x < x_{i-1} \\ 1+3 \frac{(x-x_{i-1})}{h} + 3 \frac{(x-x_{i-1})^2}{h^2} - 3 \frac{(x-x_{i-1})^3}{h^3} & , x_{i-1} \leq x < x_i \\ 1+3 \frac{(x_{i+1}-x)}{h} + 3 \frac{(x_{i+1}-x)^2}{h^2} - 3 \frac{(x_{i+1}-x)^3}{h^3} & , x_i \leq x < x_{i+1} \\ \frac{(x_{i+2}-x)^3}{h^3} & , x_{i+1} \leq x < x_{i+2} \\ 0 & , \text{ elders} \end{cases}$$

In een grafiek ziet deze basisfunctie er als volgt uit (fig. 21):

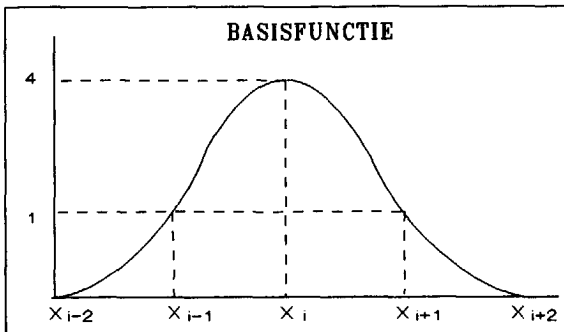


fig. 21 Basisfunctie voor de splinefunctie $S(x)$.

De splinefunctie is dus een derdegraadsfunctie. De functiewaarde, de eerste en de tweede afgeleiden zijn bovendien continu op de randen.

Als eenmaal de splinecoëfficiënten berekend zijn, kan worden overgegaan tot het benaderen van de gezochte functiewaarde. Hiervoor dient allereerst bepaald te worden tussen welke randen de x-waarde ligt waarvoor de functie moet gelden. Aangezien de basisfuncties maar op een beperkt domein invloed hebben, wordt dan de splinefunctie gegeven door (fig. 22):

$$S(x) = C_{i-1}B_{i-1}(x) + C_i B_i(x) + C_{i+1}B_{i+1}(x) + C_{i+2}B_{i+2}(x) ; (x_i < x < x_{i+1})$$

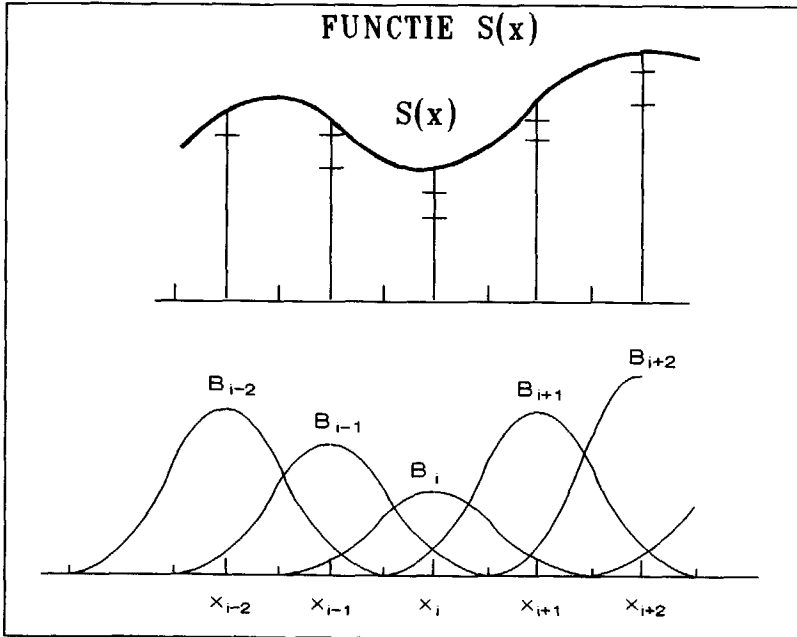


fig. 22 Approximatie-functie opgebouwd uit de basisfunctie.

Nu moeten de juiste splinecoëfficiënten worden ingevoerd bij de desbetreffende x-waarde. Het resultaat is de gewenste continue functiewaarde.

Geconcludeerd kan worden dat bij de splinebenadering alle bekende informatie uit meetgegevens gebruikt wordt en dat deze methode daardoor nauwkeuriger is dan de toepassing van polynomen. De mate van nauwkeurigheid is direct afhankelijk van het aantal basispunten en de onderlinge afstand.

Bij de keuze van de te gebruiken benaderingsmethode moet ook rekening gehouden worden met de aard van de functie. Dit betekent dat, indien het gaat om een functie met een grillig lineair karakter zoals met veel sprongen, ook een lineaire benadering gebruikt moet kunnen worden. Naast splines is ook deze methode mogelijk.

II.5 DE OPLOSSING VAN HET STELSEL VERGELIJKINGEN

Terwille van de nauwkeurigheid wordt allereerst de toestandsvector \bar{X} uit vergelijking I bepaald. Hiermee zijn de drukken in de watertorens en/of reservoirs en de buisstromen bekend. Vervolgens zijn de drukken in de overige knopen met vergelijking II te berekenen. In deze volgorde wordt in deze paragraaf de oplossing behandeld.

II.5.1 De bepaling van de toestandsvector

Vanwege het impliciete karakter van (differentiaal)vergelijking I is geen analytische oplossing mogelijk, zodat de oplossing op numerieke wijze dient te gebeuren.

Een standaard oplossing was niet direct voorhanden. Na literatuuronderzoek bleek het LSODI pakket (onderdeel LSODE lit. 13) voor het soort vergelijkingen van onderstaand type bruikbaar.

$$a(t,y) \frac{dy}{dt} = g(t,y)$$

De oplossing verloopt via de bepaling van de "restwaarde" r volgens (fig. 23):

$$r = g(t, y) - a(t, y) \frac{dy}{dt}$$

Deze restwaarde laten we tot nul naderen. Voor het numerieke rekenproces geldt dat dit, bij goed gekozen beginvoorwaarden, een stabiel proces is.

N.B. Uiteraard is het eigenlijke distributieproces ook stabiel, immers in een situatie waarin aan het net geen water wordt onttrokken of toegevoerd, is een evenwichtssituatie bereikt. Stromingen en drukken zullen hierbij dan ook een evenwichtswaarde bereiken.

Bij de nulwaardebepaling wordt gebruik gemaakt van de afgeleide waarde van de restfunctie (Newton methode) volgens:

$$\frac{dr}{dy} = \text{Jacobiaan-functie.}$$

Hier is dan:

$$\frac{dr}{dy} = \frac{dg}{dy} - \frac{da}{dy} s$$

met $s = \frac{dy}{dt}$, welke intern in LSODI bepaald wordt.

Voor $t=0$ moet deze waarde gegeven worden (startwaarde). Voordeel van deze methode is de sterk convergerende eigenschap, die gebruik maakt van de raaklijn aan de restfunctie.

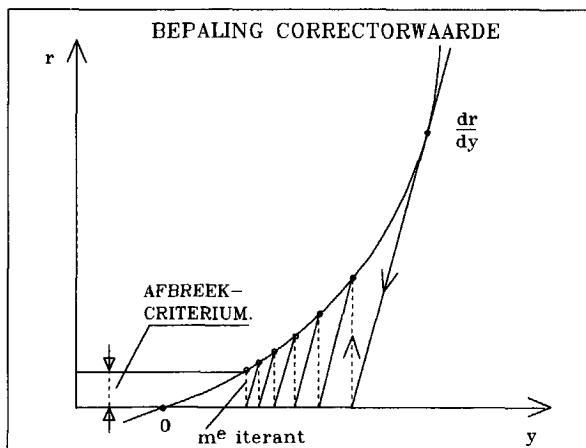


fig. 23 Raaklijnmethode aan de restfunctie.

Deze afgeleide waarde behoeft in principe slechts éénmaal bepaald te worden en niet eens exact, een benadering is voldoende.

Het iteratieproces verloopt nu zodanig dat voor iedere stap naar de functiewaarde r gekeken wordt bij het desbetreffende snijpunt van de Jacobiaanfunctie met de y -as. Is deze waarde nu bij de m^e iteratie kleiner dan of gelijk aan het afbreekcriterium, dan stopt dit proces en is y bekend voor $r \approx 0$ (corrector-methode). De waarden y en s zijn nu de invoeren voor de bepaling van de restvector, waarmee een lineaire combinatie tussen a en s gegenereerd is (subroutine APLUSP).

Het vinden van een volgende y_{m+1} waarde, behorende bij t_{m+1} (de predictorwaarde), gebeurt met een meerstapsmethode. Hiermee is het mogelijk terug te kijken naar eerder berekende waarden, waardoor deze informatie meegenomen kan worden. Deze informatie uit de vorige stappen bepaalt de volgende stap. Een en ander is in fig. 24 aangegeven.

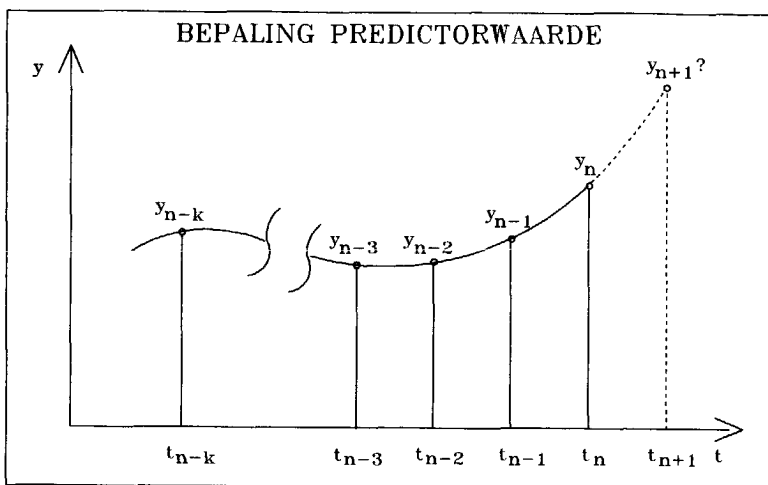


fig. 24 Bepaling predictorwaarde met meerstapsmethode.

Voor een schatting van de y_{n+1} waarde wordt gebruik gemaakt van y_n , y_{n-1} , y_{n-2} en y_{n-3} (vier stappen terug).

Gekozen kan hierbij worden uit de methoden volgens de "Adams Formulas" en volgens de "Backward Differentiation Formulas" (BDF). Voor de keuze is het begrip "stijfheid van het stelsel" van belang (lit. 14 en 15).

Een stelsel wordt stijf genoemd indien er processen met zowel kleine als grote tijdconstanten gelijktijdig aanwezig zijn.

Een distributieproces is een stijf proces. Vergelijk hiervoor het gedrag in leidingen op leveringsniveau, dat gekenmerkt wordt door sterke fluctuaties in zeer kleine tijdsperioden (minuten), met het gedrag op transportniveau, waar de tijdbasis van de fluctuaties in het algemeen groter is (15 minuten tot één uur).

De variatie in tijdconstanten loopt dus uitéén van minuten tot één uur.

Voor dit probleem zal de meerstapsmethode volgens BDF worden gebruikt, omdat deze numerieke differentiatiemethode zich beter leent voor stijve stelsels dan de Adams Formulas, die uitgaat van numerieke integratie. Voor nadere informatie over deze methode en de bijbehorende stabiliteitscriteria verwijs ik naar genoemde literatuur.

Voor de bepaling van de predictorwaarde construeert de BDF methode een (Newton) interpolatie-kromme door de vier eerder berekende (corrector) waarden.

De basispunten voor deze polynoom zijn t_n, t_{n-1}, t_{n-2} en t_{n-3} .

Op deze manier wordt een uitdrukking gevonden waarin y_{n+1} impliciet voorkomt volgens:

$$\sum_{j=1}^k \frac{1}{j} \nabla^j y_{n+1} = h y_{n+1}$$

waarin h de constante rekenstap is en de achterwaartse stappen gedefinieerd zijn als:

$$\nabla^0 y_{n+1} = y_{n+1}$$

$$\nabla^j y_{n+1} = \nabla^{j-1} y_{n+1} - \nabla^{j-1} y_n$$

Dit uitgeschreven voor $k=4$, geeft (lit. 14) :

$$25/12 y_{n+1} - 4y_n + 3y_{n-1} - 4/3 y_{n-2} + 1/4 y_{n-3} = h y_{n+1}$$

(Opgemerkt wordt dat de waarde voor k aan grenzen gebonden is, namelijk $k < 6$ vanwege de stabiliteit).

Het bovenstaande, toegepast op differentiaal vergelijking I, geeft een restvector volgens:

$$\bar{R}(\bar{X}) = G\bar{X} + H\bar{X}^2 + \bar{B} + \bar{C} - A\bar{X}$$

De meest volledige vorm van de Jacobiaan-functie wordt hiermee:

$$\frac{d\bar{R}(\bar{X})}{d\bar{X}} = G + \frac{dH\bar{X}^2}{d\bar{X}} + \frac{d\bar{B}}{d\bar{X}} + \frac{d\bar{C}}{d\bar{X}}$$

Opgemerkt was reeds dat het niet essentieel is dat deze Jacobiaan exact bepaald wordt. Dat een (goede) benadering voldoende is, blijkt ook uit fig. 23. Verloopt de raaklijn namelijk (iets)

afwijkend van de exacte helling, dan nog komt de oplossing binnen zijn afbreekcriterium (iets eerder of later). Dit betekent ook dat, indien de Jacobiaan-matrix veel nul-elementen bevat, met een (smalle) diagonaal-bandmatrix gewerkt kan worden, zodat:

$$\frac{d\bar{R}}{d\bar{X}} \approx \begin{bmatrix} & & & 0 \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ 0 & & & \end{bmatrix}$$

Ook is het zo dat bij de oplossing voor een volgende waarde van \bar{X} niet steeds de Jacobiaan opnieuw bepaald wordt. Een criterium in het programma is gekozen op 6 iteraties. Indien voor de nulpuntsbepaling van de restvector \bar{R} meer dan 6 iteraties nodig zijn, wordt de Jacobiaan-waarde opnieuw bepaald.

Opgemerkt wordt dat de afgeleide waarde van de afname vector \bar{C} nagenoeg nul zal zijn. Immers, het afnamepatroon is zeer zwak afhankelijk van de toestand!

Voor de onderstaande verschillende instroomsituaties en het gebruik van aanjagers in een net wordt de oplossing van de Jacobiaan, dus de toestandsvergelijking, aangegeven.

We onderscheiden instroomsituaties:

- via bekende volumestromen, ofwel pompen ver buiten de systeemgrens (fig. 10);
- via pompen op de systeemgrens (fig. 11).

en vervolgens:

- het gebruik van pompen binnen de systeemgrens (fig. 12).

Bekende volumestromen

Hier zijn de pompen (ver) buiten de systeemgrenzen geplaatst en wordt ter plaatse van de systeemgrens de instroom gemeten.

In dit geval is: $\frac{d\bar{B}}{d\bar{X}} = 0$ zodat voor de Jacobiaan-functie over blijft:

$$\frac{d\bar{R}(\bar{X})}{d\bar{X}} = G + \frac{dH\bar{X}^2}{d\bar{X}} = \left(G + H \frac{d\bar{Y}}{d\bar{X}} \right)$$

Opmerking

Al eerder werd aangehaald dat, indien zich in een reservoir (of toren) een zogenaamde overloop bevindt, afhankelijk van het waterniveau, twee situaties zijn te beschouwen. Met betrekking tot deze diagonaal elementen geldt dan voor de afgeleide druktermen:

$$\text{reservoirhoogte } h > h_0: \left(\frac{d\bar{P}}{d\bar{X}} \right)_{11} \neq 0$$

$$\text{reservoirhoogte } h \leq h_0: \left(\frac{d\bar{P}}{d\bar{X}} \right)_{11} = 0$$

Dit geldt voor de ontvangst van het water in het reservoir en uiteraard niet voor de levering vanuit het reservoir!

Pompen op systeemgrens

De instroom geschiedt via pompen die gesitueerd zijn aan de rand van het netwerk, tevens de systeemgrens.

In dit geval is de term $\frac{d\bar{B}}{d\bar{X}}$ in de Jacobiaan ongelijk aan nul.

De voordruk P_0 wordt nu geleverd door het waterniveau in het reservoir.

De persdruk P is nu toestandsafhankelijk. Het verband tussen de levering en de persdruk geeft de pompkarakteristiek. Uit discrete waarden overeenkomstig deze karakteristiek wordt nu met splines een benadering bepaald volgens:

$$\varphi = G(P - P_0)$$

Hiermee is deze instroomfunctie continu en differentieerbaar.

De instroomtermen van $\frac{d\bar{B}}{d\bar{X}}$ in de Jacobiaan zijn hiermee:

$$\frac{dG(P-P_0)}{d\bar{X}} = \frac{dG(P-P_0)}{d(P-P_0)} * \frac{d(P-P_0)}{d\bar{X}} = \frac{dS(P-P_0)}{d(P-P_0)} * \left(\frac{dP}{d\bar{X}} - \frac{dP_0}{d\bar{X}} \right)$$

De term $\frac{dG(P-P_0)}{d(P-P_0)}$ kan, uitgaande van de benaderde pompkarakteristiek, door middel van een subroutine bepaald worden.

De term $\frac{dP}{d\bar{X}} = 0$ omdat de voordruk onafhankelijk van de toestand is. De bepaling van de afgeleide druktermen $\frac{d\bar{P}}{d\bar{X}}$ verloopt via vergelijking II volgens:

$$\frac{d\bar{P}}{d\bar{X}} = \frac{d(D\bar{X}^2 + E\dot{\bar{X}} + \bar{F})}{d\bar{X}}$$

(Hierin is met de genoemde transformatie in II.4.2 matrix D toestandsonafhankelijk gemaakt, terwijl voor \bar{X} een weerstandsvector \bar{Y} is ingevoerd.)

Hiermee is $\frac{dD\bar{X}^2}{d\bar{X}}$ ofwel $\frac{dD\bar{Y}}{d\bar{X}}$ analoog aan de situatie bij "gegeven instroom".

De afgeleide $\frac{dE\dot{\bar{X}}}{d\bar{X}} = 0$

Nu resteert nog de bepaling van de term $\frac{d\bar{F}}{d\bar{X}}$ (de afgeleide van de bufferdrukken).

Hiervoor geldt het volgende (fig. 25):

Tussen de toren op knoop 1 en het instroompunt k met de daar gesitueerde pomp is een tracé vastgesteld voor de berekening van de druk in knoop k.

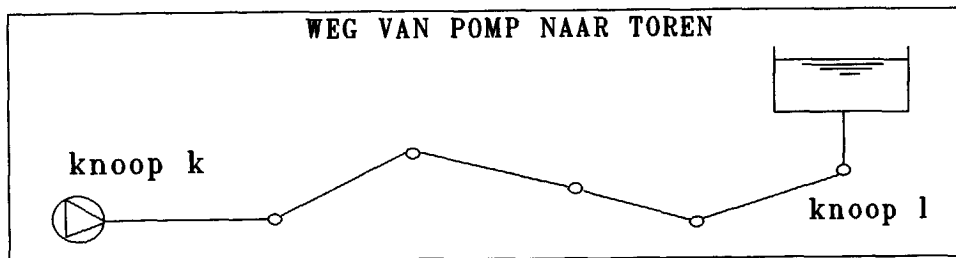


fig. 25 Vastgesteld tracé tussen pomp- en watertorenknoop.

De torendruk $\bar{F}(k)$ in knoop 1 correspondeert met het 1^e element van \bar{X} , dus:

$$\bar{F}(k) = \bar{X}(1)$$

Nu geldt bij waterniveaus in de toren die groter zijn dan een eventueel aanwezige overstort

$$\frac{d\bar{F}(k)}{d\bar{x}} = [0 \ 0 \ \dots\dots 1 \ 0 \ \dots\dots 0]$$

waarbij het 1 element op plaats 1 staat.

Zijn de waterniveaus lager dan de aanwezige overstorthoogte, dan geldt:

$$\frac{d\bar{F}(k)}{d\bar{x}} = [0 \ 0 \ \dots\dots 0] \text{ (allen nul-elementen!)}$$

Hiermee is de Jacobiaan bepaald.

Aanjagers binnen de systeemgrenzen

Zijn er aanjagers binnen een net opgenomen, dan is de eerder behandelde maasvergelijking enigszins afwijkend.

Vanwege de drukbalans over een maas is het nu beter om het drukverschil over de aanjager expliciet te schrijven als functie van de volumestroom volgens (fig. 26):

$$\Delta P = G(\varphi_j)$$

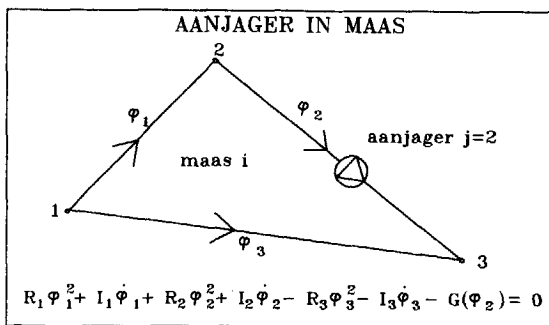


fig. 26 Aanjagers in gesloten maas.

Algemeen geldt tussen twee knopen i en i+1, waartussen buis j met een aanjager, dat:

$$P_i - P_{i+1} = R_j \phi_j^2 + I_j \dot{\phi}_j - G(\phi_j)$$

Daarom wordt aan de (differentiaal)vergelijking I een zogenaamde "aanjaagvector" \bar{J}_1 toegevoegd volgens:

$$A \dot{\bar{X}} = G \bar{X} + H(\bar{X}) \bar{X}^2 + \bar{B} + \bar{C} + \bar{J}_1$$

waarin de elementen van \bar{J}_1 zijn:

$$\bar{J}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ G(\phi_j) \\ 0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \text{--- knooppuntsvergelijkingen} \\ \text{--- maasvergelijkingen} \\ \text{--- onderlinge buffervergelijkingen} \end{array}$$

Slechts de elementen op de $(n_{kno}+i)^*$ plaats met $(i=1..n_{ma})$ uit de desbetreffende maasvergelijkingen zijn gelijk aan $G(\phi_j)$, de overige zijn gelijk aan nul.

Evenzo verandert vergelijking II ook enigszins door toevoeging van vector \bar{J}_2 volgens:

$$\bar{P} = D(\bar{X})\bar{X}^2 + E \dot{\bar{X}} + \bar{F} + \bar{J}_2$$

Deze vector bestaat uit de drukverhogingselementen volgens de pompkarakteristiek van de aanjager die bij de oorspronkelijke drukken, zonder aanjager, opgeteld dienen te worden.

Voor de desbetreffende rij geldt dat de bijdrage van de aanjager is:

$$\frac{dG(\phi_j)}{d\bar{X}} = \left[\frac{dG(\phi_j)}{dP_1} \quad \frac{dG(\phi_j)}{dP_j} \quad \frac{dG(\phi_j)}{dP_{nwa}} \quad \frac{dG(\phi_j)}{d\phi_1} \quad \frac{dG(\phi_j)}{d\phi_j} \quad \frac{dG(\phi_j)}{dP_{nbui}} \right]$$

Dus:
$$\frac{dG(\phi_j)}{d\bar{X}} = (0 \dots 0 \quad \frac{dG(\phi_j)}{d\phi_j} \quad 0 \dots 0)$$

De afgeleide $\frac{dG(\phi_j)}{d\phi_j}$ is weer door middel van een numerieke routine te bepalen.

Het in werking komen van de aanjager gebeurt als de druk op een knoop achter de aanjager een bepaalde minimumwaarde onderschrijft. Bij overschrijding van een maximumwaarde van de druk op dat punt schakelt de aanjager weer uit.

II.5.2 De beginvoorwaarden

De oplossing van de toestandsvector \bar{X} is éénduidig indien de beginvoorwaarden van het proces gegeven zijn. Het numerieke rekenproces is weliswaar stabiel, maar dit neemt niet weg dat de beginvoorwaarden goed gekozen dienen te worden, omdat anders het numerieke proces extreem grote foute waarden levert.

Het numerieke proces vereist niet alleen de beginvoorwaarde voor de toestandsvector \bar{X}_0 op $t=0$, maar ook de afgeleide waarde $\dot{\bar{X}}_0$. Dit is noodzakelijk om het numerieke proces op te starten (meerstaps-methode is niet zelfstartend).

De keuze van \bar{X}_0 moet zo reëel mogelijk zijn, terwijl de waarde van $\dot{\bar{X}}_0$ zo bepaald moet worden, dat de differentiaalvergelijking consistent is.

Voor de bepaling van \bar{X}_0 kunnen de onbekende bufferdrukken (toren- of reservoirstanden) op $t=0$ binnen zekere grenzen vrij genomen worden. In de regel zijn zij bekend uit metingen en als zodanig in te voeren. Bij een watertoren ligt deze waarde tussen 25 - 38 mwk (250 - 380 kPa).

Voor de stromingen op $t=0$ is een algoritme opgenomen dat in een 10-tal stappen een stromingsevenwicht bepaalt voor dit begintijdstip. Hierbij wordt in de eerste stap een vaste verdeling gemaakt, waarbij uitgegaan wordt van de gedefinieerde geometrie en van de voor dit tijdstip constante instromen en afnamen.

Deze eerste stap verdeelt de instromen evenredig over het aantal bekende afvoerende buizen van alle instroomknopen (van iedere buis is vooraf een stromingsrichting aangenomen). Met eventueel aanwezige afnamen op de instroomknopen is hierbij rekening gehouden.

Omdat de -naar de knopen toevoerende buizen- op hun beurt afvoerende buizen zijn van de voorliggende knopen, worden zij in deze stap wel meegenomen; deze buizen krijgen echter aanvankelijk geen volumestroom. De stromingen in de afvoerende buizen vormen de instromen naar de volgende knopen in het net, waarbij in de eerste

stap de verdeling op gelijke wijze over de afvoerende buizen van die knopen plaatsvindt. In de volgende 9 stappen worden deze stromingen steeds nauwkeuriger bepaald, nu mede door de invloed van de buisweerstand in rekening te brengen. Een en ander is geïllustreerd in fig. 27.

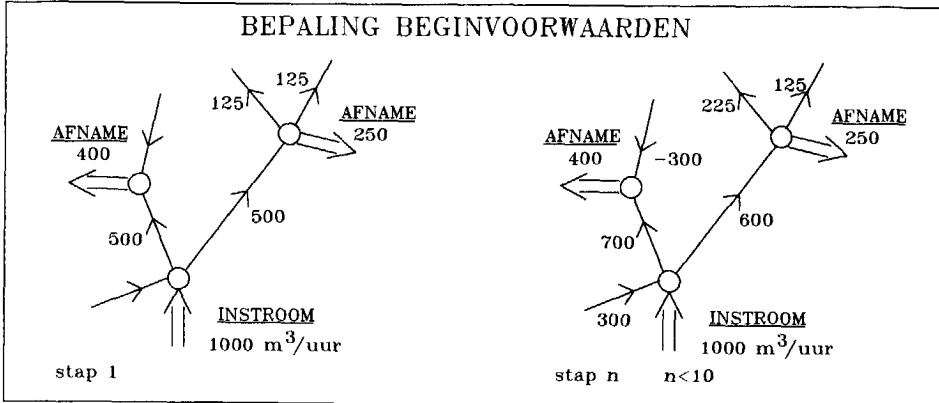


fig. 27 Bepaling \bar{X}_0 op tijdstip $t=0$.

De waarde $\dot{\bar{X}}_0$ moet zodanig bepaald zijn dat geldt:

$$G \bar{X}_0 + H \bar{X}_0^2 + \bar{B}_0 + \bar{C}_0 - A \dot{\bar{X}}_0 \approx 0$$

We splitsen hiervoor de toestandsvector in het deel van de buisstromen en het deel van de bufferdrukken.

Het deel van de veranderende buisstromen (versnellingen en vertragingen) $\dot{\bar{\psi}}_0$ wordt op nul gesteld. Uit aftastende berekeningen blijkt dat $\dot{\bar{\psi}}_0$ zeer klein is (orde 10^{-8}). Voor het numerieke proces is deze gelijk aan nul gesteld.

De waarden $\dot{\bar{P}}_{w0}$ kan berekend worden volgens $\dot{\bar{P}}_{w0} = \frac{\dot{\bar{\psi}}_0}{C}$, waarmee nu ook $\dot{\bar{X}}_0$ bepaald is, zodat vergelijking I op te lossen is.

Opmerking

De waarde van het deel voor de buisstromen van $\dot{\bar{X}}_0$, dus $\dot{\bar{\psi}}_0$, is uit te rekenen door op onderstaande wijze dit deel expliciet te maken. (zie ook II.4.1 structuur van de matrices).

Uit
$$\begin{aligned}
 -G_{12}\dot{\varphi}_0 &= \dot{B}_1 + \dot{C}_1 & (\text{volgt uit } -G_{12}\varphi_0 &= B_1 + C_1) \\
 A_{32}\dot{\varphi}_0 &= H_{32}\varphi_0^2 \\
 A_{42}\dot{\varphi}_0 &= G_{41}Pw + H_{42}\varphi_0^2
 \end{aligned}$$

volgt

$$\begin{bmatrix} -G_{12} \\ A_{32} \\ A_{42} \end{bmatrix} \dot{\varphi}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ G_{41} \end{bmatrix} Pw + \begin{bmatrix} 0 \\ H_{32} \\ H_{42} \end{bmatrix} \varphi_0^2 + \begin{bmatrix} \dot{B}_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{C}_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Omdat matrix $\begin{bmatrix} -G_{12} \\ A_{32} \\ A_{42} \end{bmatrix}$ inverteerbaar is, kan $\dot{\varphi}_0$ expliciet gemaakt

worden, zodat $\dot{\varphi}_0$ te berekenen is volgens:

$$\dot{\varphi}_0 = \begin{bmatrix} -G_{12} \\ A_{32} \\ A_{42} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ G_{41} \end{bmatrix} Pw + \begin{bmatrix} -G_{12} \\ A_{32} \\ A_{42} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ H_{32} \\ H_{42} \end{bmatrix} \varphi_0^2 + \begin{bmatrix} -G_{12} \\ A_{32} \\ A_{42} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{B}_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -G_{12} \\ A_{32} \\ A_{42} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{C}_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

II.5.3 De drukbepaling

Na berekening van de toestandsvector \bar{X} zijn via vergelijking II de drukken in de knooppunten te bepalen.

De drukbepaling in een willekeurig knooppunt geschiedt vanuit de, eventueel fictieve, bufferdruk die reeds met de toestandsvector (respectievelijk uit een meting, het drukmeetpunt) bekend is.

Vanuit de knopen waar die buffers gesitueerd zijn, worden met de eveneens bekende volumestromen in de buizen de drukken in de overige knopen van het netwerk berekend.

Hiervoor worden zogenaamde "boomtracés" bepaald volgens fig. 28.

In een netwerk wordt vanuit elk knooppunt met een buffer een boomtracé geconstrueerd.

In dit geval is een boomtracé een aaneenschakeling van buizen op een zodanige wijze dat alle knopen verbonden worden met de buffers, zonder dat er mazen worden gevormd.

De verschillende boomtracés mogen geen knooppunt gemeen hebben, omdat de drukberekening voor een bepaald knooppunt slechts van één bufferdruk gebruik maakt.

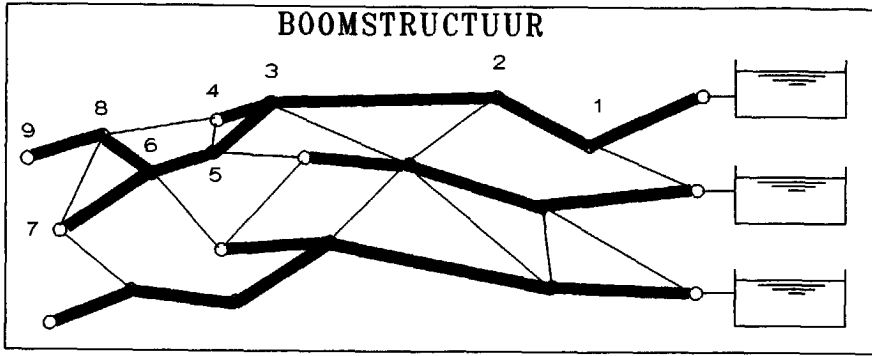


fig. 28 Constructie boomtracés.

De gevonden tracés worden in de D en E matrices weggeschreven, waarbij gebruik wordt gemaakt van een subroutine.

Voor het onderstaande boomtracé in fig. 29 ziet, voor knooppunt "k", de bijbehorende rij in de matrix er als volgt uit:

(1 51 50 23 11 10 0....)

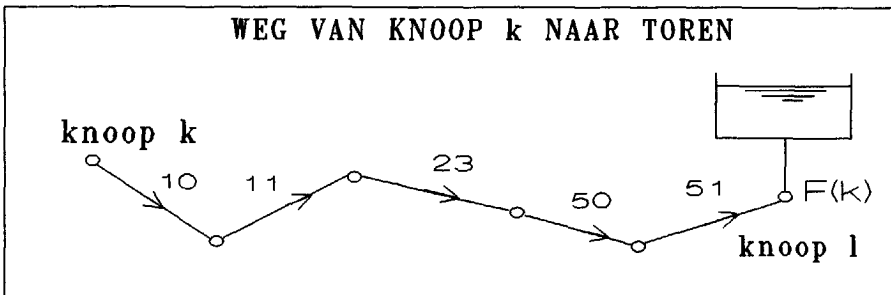


fig. 29 Boomtracé van knoop 1 naar knoop k.

De druk in knoop k is de somming van de torendruk $F(k)$ en de afzonderlijke drukverliezen van alle buizen j die in dit boomtracé naar k voorkomen, volgens:

$$\bar{P}(k) = \sum_{j=1}^{nbui} D_k(j) \bar{Y}_{wa} (n_{wa} + j) + \sum_{j=1}^{nbui} E_k(j) \bar{X}_{wa} (n_{wa} + j) + \bar{F}(k)$$

De volumestroom in buis j staat op de $(n_{wa} + j)^e$ plaats in de toestandsvector.

De waarde van dit element in matrix D is: $D_x(n_{wa} + j) = \pm 1$
 (positief indien de stroming van de knoop naar de buffer is).

DMATRIX laag 1 : $n_{wa} + j$
 laag 2 : ± 1

In de E matrix staat op de overeenkomstige plaats een getal I met gelijk teken, dus $E_x(n_{wa} + j) = \pm I$

of:

EMATRIX laag 1: $n_{wa} + j$
 laag 2: $\pm I$

Hiermede zijn alle drukken in alle knopen berekend.

II.5.4 De afnamevector

Een belangrijke rol bij de oplossing speelt de afnamevector.

In de knopen van de schematisatie zijn de tijdsafhankelijke afnamen gesitueerd die in de toestandsvergelijking worden weergegeven met vector \bar{C} .

De afname op een knoop zal in veel gevallen een resultante voorstellen van het totale verbruik van een geconcentreerd deel van een netwerk. Zo zullen bij beschouwingen op leveringsniveau de werkelijke afnamen in de straten geschematiseerd zijn op één of meerdere knopen. Bij beschouwingen op het primaire niveau zullen de verbruiken van totale stadsgebieden als afnamen op knopen geconcentreerd zijn.

Fig. 30 geeft hier een beeld van.

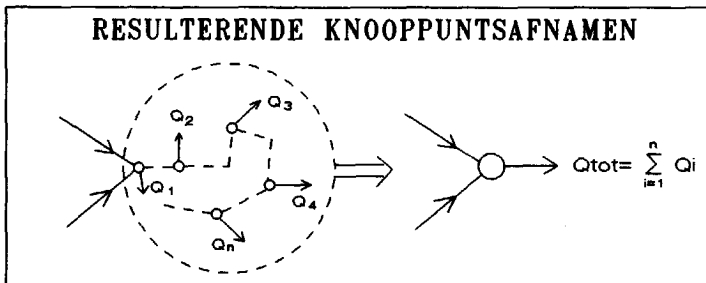


fig. 30 Resulterende knooppuntsafnamen bij schematisatie.

De vervangende afnamehoeveelheid is de sommatie van de afzonderlijke knoopafnamen die geconcentreerd zijn, zoals in fig. 30 is aangegeven.

De afnamen omvatten twee categorieën verbruiken, die samen de totale vector \bar{c} omvatten: het huishoudelijk verbruik en het zakelijk verbruik:

Gezien de berekeningsnauwkeurigheid is een zo goed mogelijke wijze van modelleren van de afnamevector van groot belang. Hieronder is te verstaan dat gemiddelde waarden zo nauwkeurig mogelijk geschat moeten worden, eventueel met fluctuaties.

Bij continue bemetering en registratie zou in feite deze vector een gegeven zijn en als zodanig direct ingevoerd kunnen worden.

Bemeterd wil in de praktijk zeggen dat éénmaal per jaar de meterstand wordt opgenomen, zodat deze waarde omgezet moet worden naar seizoen-, uur- en zonodig naar kleinere momentafnamen.

De afnamepatronen voor beide categorieën worden voor een door te rekenen simulatieperiode in het verbruikersprogramma VERBRUIK ontwikkeld.

Dit is als subroutine opgenomen en biedt de mogelijkheid om uit (gemeentelijke) bestanden voor het aantal woningen, de bevolkingsdichtheid en de jaarverbruiken goede schattingen te maken voor de genoemde verbruikerscategorieën. Omzetting vindt vervolgens plaats naar continue functies over een te beschouwen periode.

We onderscheiden hierbij 3 mogelijkheden:

- het verbruik per knoop is overeenkomstig het bekende (totale) instroomp patroon naar het net;
- het verbruik volgens gekozen verhoudingen;
- het verbruik volgens verdeling over knopen en buurten.

Het verbruik volgens het instroomp patroon naar een net

Indien voor een net de variaties in het totale instroomvolume afhankelijk van de tijd bekend zijn, kunnen deze aanvankelijk evenredig verdeeld worden over alle aanwezige knopen, waarbij dan bovendien voor iedere knoop het afnamepatroon volgens de instroom

gekozen wordt. In een later stadium kunnen hierop verfijningen worden aangebracht.

Het verbruik volgens verhoudingen

Een fractionele verdeling kan tot stand komen door voor iedere knoop te werken met de verhouding van het knoopverbruik tot het totale verbruik van het net. Voor knoop i is de verhouding:

$$f_i = \frac{(q \text{ huishoudelijk} + q \text{ zakelijk})_i}{(Q \text{ huishoudelijk} + Q \text{ zakelijk})_{\text{totaal}}}$$

Hierin is

q : het knoopverbruik voor de aangegeven categorie.

Q : het totale verbruik voor de aangegeven categorie.

Het verbruik volgens verdeling over knopen en buurten

Dit is een verfijnde methode die uitgaat van een aantal deelgebieden waarin het totale distributiegebied is opgedeeld.

De schematisatie, met hierin de opgenomen knopen, wordt gecombineerd met de bijbehorende deelgebieden.

Essentieel bij deze methode is dat een verdere detaillering van lokale verbruikerspatronen per gebied hierin betrokken kan worden, zoals variatie in aard van de bevolking, de industrialisatiegraad voor zowel de zakelijke als de huishoudelijke afnamepatronen en zonodig andere factoren.

Voor de bepaling van de afzonderlijke knooppuntsafnamen geldt dat een verdeelsleutel nodig is. Een knoop kan namelijk aan verschillende deelgebieden leveren en omgekeerd kan één deelgebied aan verschillende knopen water onttrekken. Het omzetten van verbruiken naar knooppuntsafnamen gaat met een toewijzingssubroutine in VERBRUIK, die aanvankelijk is gebaseerd op een evenredige verdeling, zie hiervoor onderstaand voorbeeld en fig. 31.

Knooppunt 2 levert aan 3 deelgebieden

Gebied A onttrekt zijn water aan 3 knopen, $1/3$ deel van dit verbruik wordt geleverd door knooppunt 2.

Gebied B onttrekt zijn water aan 4 knopen, $1/4$ deel van dit verbruik wordt geleverd door knooppunt 2.

Gebied C onttrekt zijn water aan 3 knopen, $1/3$ deel van dit verbruik wordt geleverd door knooppunt 2.

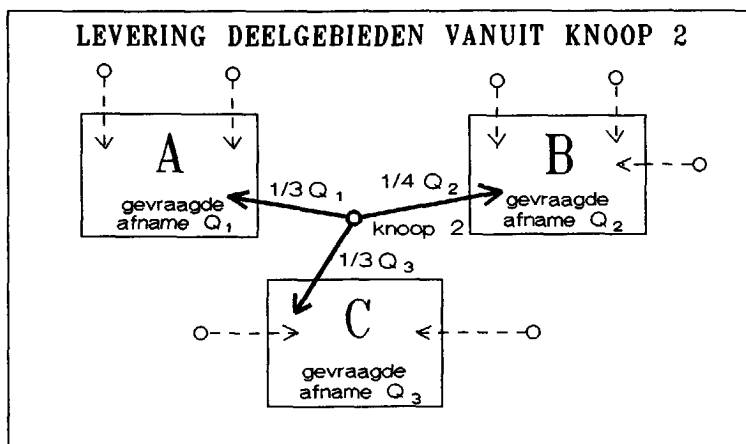


fig. 31 Leveringsverdeling over buurten.

In de genoemde verbruikerssubroutine worden de huishoudelijke en zakelijke verbruiken apart berekend volgens door de gebruiker zelf te kiezen varianten, waarna een sommering plaatsvindt per afzonderlijke knoop.

De verbruikerssubroutine is zodanig opgezet, dat een aantal varianten voor zowel zakelijke als huishoudelijke verbruiken gebaseerd op de eerder genoemde lokale omstandigheden, nagebootst kan worden gerelateerd aan het desbetreffende hiërarchisch niveau. Dit zijn een viertal (1 tot en met 4) huishoudelijke en een vijftal (a tot en met e) zakelijke varianten.

Uitgaande van discreet ingevoerde afnamewaarden worden met behulp van splines continue functies gegenereerd. De discrete waarden

worden afhankelijk van het hiërarchisch niveau bepaald. Hiervoor zijn de tijdstappen van belang, die kunnen variëren van 1 uur tot 15 minuten op primair of regionaal niveau en van 15 minuten tot 1 minuut op leveringsniveau.

De afnamevector zal in het algemeen zeer zwak afhankelijk zijn van de toestand zodat de term $\frac{d\bar{c}}{d\bar{x}}$ in de Jacobiaan nul is. In het geval dat een lek wordt gesimuleerd door een afname ter plaatse van het lek, is er wel een drukafhankelijkheid zodat $\frac{d\bar{c}}{d\bar{x}}$ ongelijk nul zal zijn (eventueel kan voor aftastende calamiteitsberekeningen de afname als zijnde het lek, voor korte tijd constant gehouden worden).

Fig. 32 geeft slechts enkele voorbeelden voor beide categorieën.

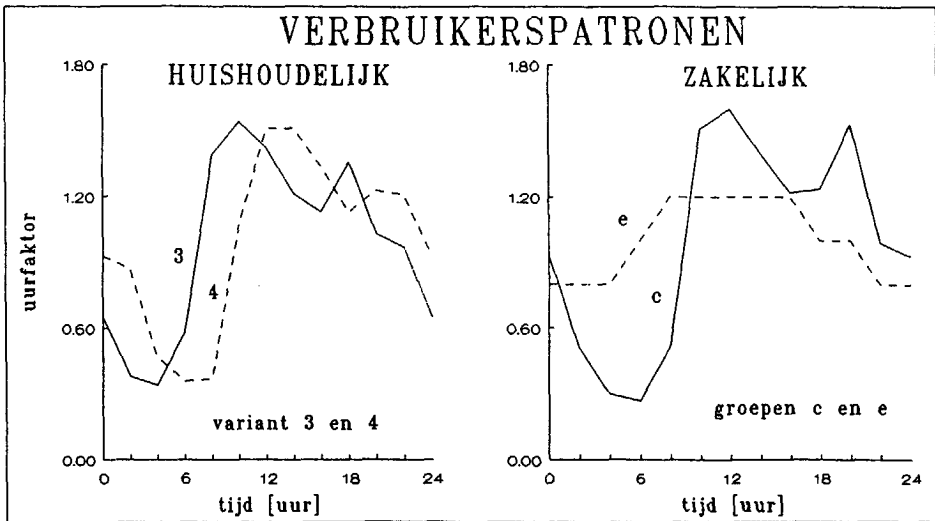


fig. 32 Enkele verbruikersvarianten.

Desgewenst zijn naast genoemde varianten ook andere willekeurige patronen te genereren.

Ook kan gewerkt worden met piek- en/of seizoensfactoren (een jaar is dan verdeeld in vier seizoenen met ieder een bijbehorende factor).

Omdat op het leveringsniveau de afnamen per zeer korte tijdseenheid aanmerkelijk fluctueren, is het noodzakelijk om deze fluctua-

ties te kunnen nabootsen. Dit kan door op het omschreven (gemiddelde) afnamepatroon een "ruissignaal" te superponeren. Fig. 33 toont een meting van de snelheid op leveringsniveau. De fluctuaties ten gevolge van het afnamepatroon spelen zich af op basis van minuten.

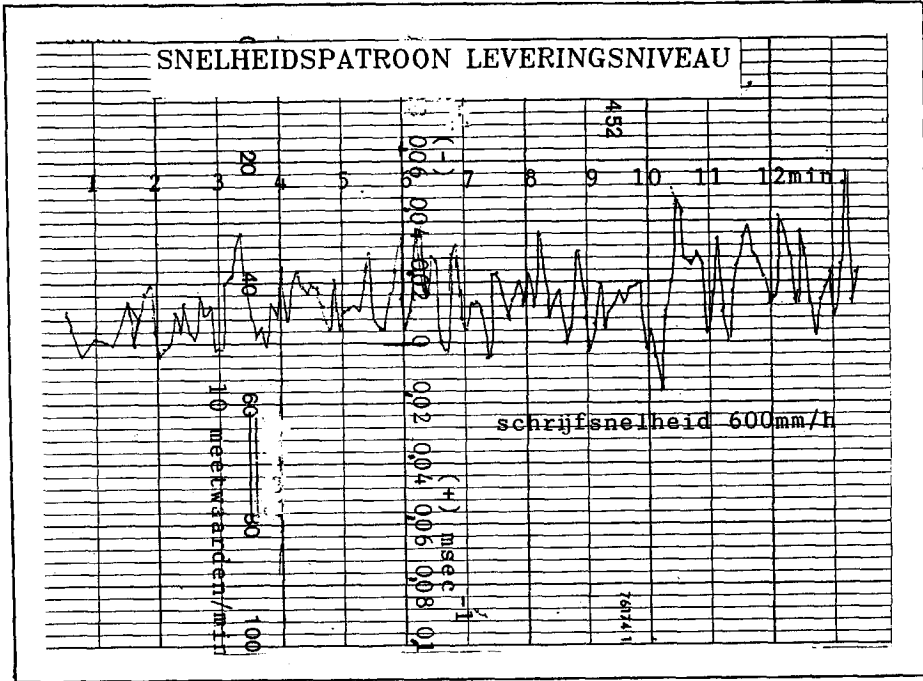


fig. 33 Snelheidsmeting in buis op leveringsniveau.

Een dergelijk snelheidspatroon wordt door dit ruissignaal gesimuleerd en vertoont de eigenschappen van het afnamegedrag van een aantal woningen in een straat of een flat.

De computertechniek biedt met "random" de mogelijkheid van een ruis, die in amplitude- en frequentiegrootte gevarieerd kan worden teneinde de werkelijkheid zo goed mogelijk te simuleren.

II.6 DIMENSIEVERKLEINING

Zoals bleek in II.3 bij de illustratie op een testnet, leidt een distributienet snel tot grootschalige systemen. Een grootschalig

systeem heeft een dermate grote dimensie dat het doorrekenen een te lange rekentijd vergt.

In het beschreven illustratienet was bij 4 buizen en 2 watertorens de dimensiegrootte ($n_{\text{buil}} + n_{\text{vr}}$) = 6.

(Een sterk geschematiseerd netwerk van het Amsterdamse distributienet heeft een ordegrööte van circa 600. Hierbij zijn dan slechts de hoofdleidingen op primair en regionaal niveau met middellijnen van 300 mm en groter meegenomen).

Dergelijke grote dimensies hebben niet alleen het nadeel van (te) lange rekentijden, ook de overzichtelijkheid en de controleerbaarheid van de resultaten zijn minder.

Bij een dimensieverkleining dient gestreefd te worden naar een zo gering mogelijk informatieverlies met een zo goed mogelijke beschrijving van de werkelijkheid.

Dimensieverkleining moet daarom op een zodanig wijze zijn uitgevoerd, dat de eigenschappen van het totale systeem gewaarborgd blijven. Dit geldt met name voor de stabiliteit, de regelbaarheid en de waarneembaarheid van het systeem.

In de literatuur is weinig bekend over dimensieverkleiningsmethoden. Vaak is een schematisatie op ad hoc wijze bepaald, waarbij buizen en knopen zijn weggelaten en een fundamentele aanpak ontbreekt.

Op basis van kennis en ervaring wordt veelal schouwend een dimensieverkleining uitgevoerd. Vaak komt dit er op neer dat buizen kleiner dan een bepaalde lengte en/of middellijn niet worden meegenomen. Een en ander kan nogal arbitrair zijn, waarbij achteraf lang niet altijd de invloed van het weggelaten effect wordt gecontroleerd op relevantie. Vaak zijn het juist deze buizen waarin drukvereffening of stagnatie een rol kan spelen.

Indien het gaat om een kwaliteitsbeschouwing waarbij reis- en verblijftijden, trajecten en herkomsten van de instromen moeten worden bepaald, kan deze werkwijze leiden tot foute conclusies.

Onderstaand volgt een tweetal methoden ter verkleining van dimensiegrootte:

- aggregatie bij het schematiseren;
- opdeling in subsystemen.

II.6.1 De aggregatie bij het schematiseren

Bij verkleining van de dimensie zal altijd de "hydraulische equivalentie" voorop moeten staan.

Dit betekent dat verscheidene buizen vervangen worden door één resulterende buis, waarbij de hydraulische eigenschappen nagenoeg hetzelfde blijven als bij het oorspronkelijk aantal buizen.

Het programma biedt de mogelijkheid om seriële en/of parallelle buizen samen te nemen, zodanig dat de genoemde equivalentie behouden blijft.

We onderscheiden hierbij:

- parallelle buizen;
- seriële buizen.

Parallelle buizen

Uitgangspunt is hierbij dat het drukverlies ΔP over deze buizen gelijk blijft en de afzonderlijke volumestromen opgeteld worden, zie fig. 34.

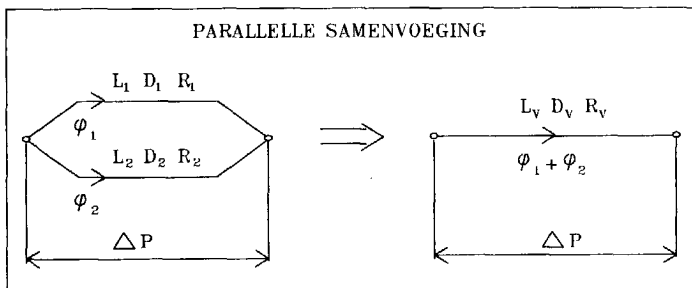


fig. 34 Samenvoegen van parallelle buizen.

Uit de uitdrukking voor het drukverlies volgt:

$$\Delta P = R_v \varphi^2 = R_v (\varphi_1 + \varphi_2)^2 \quad (R_v \text{ vervangende weerstand}).$$

Dus:
$$\sqrt{\frac{\Delta P}{R}} = \varphi_1 + \varphi_2$$

Voor de afzonderlijke buizen geldt: $\varphi_1 = \sqrt{\frac{\Delta P}{R_1}}$ en $\varphi_2 = \sqrt{\frac{\Delta P}{R_2}}$

dus:
$$\sqrt{\frac{\Delta P}{R_v}} = \sqrt{\frac{\Delta P}{R_1}} + \sqrt{\frac{\Delta P}{R_2}}$$

of:
$$\frac{1}{\sqrt{R_v}} = \frac{1}{\sqrt{R_1}} + \frac{1}{\sqrt{R_2}}$$

Met $R_v = \frac{\lambda L}{D^5}$ geldt het algemene verband voor n parallelle buizen:

$$\sqrt{\left(\frac{D^5}{\lambda L}\right)_v} = \sum_{j=1}^n \sqrt{\left(\frac{D^5}{\lambda L}\right)_j}$$

De wijze echter waarop in het programma (WEERSTAND) de vervangende weerstandskarakteristiek wordt bepaald, is directer.

Deze methode geeft bovendien mogelijkheden voor het geval er vertragsingsverliezen als gevolg van appendages aanwezig zijn.

Bij deze methode worden splinefuncties toegepast.

Uitgaande van een gekozen drukverlies over de twee parallelle buizen worden de daarbij afzonderlijke volumestromen φ_1 en φ_2 bepaald. Vervolgens worden deze volumestromen gesommeerd, waarmee een vervangend punt is verkregen, zie fig. 35.

Achtereenvolgens zijn na herhaling voor een aantal verschillende drukverliezen ΔP_n , ofwel verschillende stromingssituaties (Regetallen), met splines continue functies te genereren.

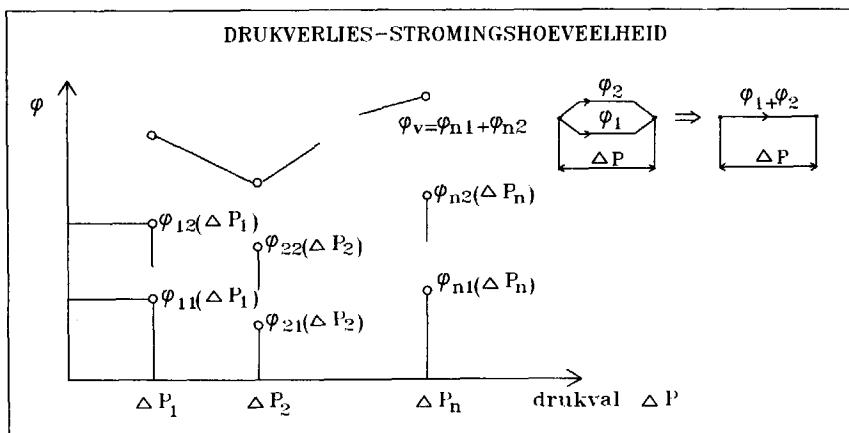


fig. 35 Bepaling vervangende weerstandskarakteristiek.

Met het verband $\Delta P = R_v \varphi^2$ is de vervangende weerstandswaarde R_v te bepalen (en vervolgens λ_v).

De vervangende karakteristiek voor samenvoeging volgens fig. 36 is hiermee tot stand gekomen. Deze lijnen geven het Moody diagram weer voor deze buisstromen. Hiermee ligt dan ook de k -waarde vast!

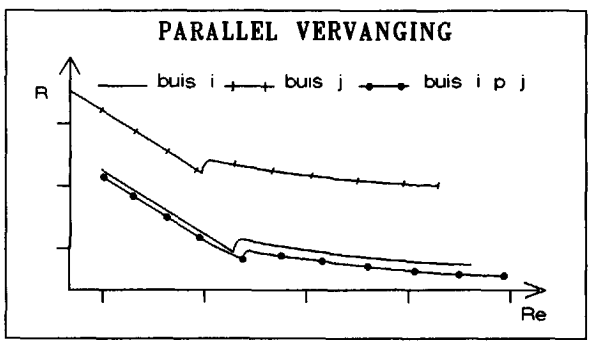


fig. 36 Parallele samenvoeging volgens splinefuncties.

In fig. 36 zijn de parallelle buizen i en j tot één samengenomen als buis $i-p-j$ (p staat voor parallel).

In het geval dat ook vertragsingsverliezen een rol spelen, is deze methode op dezelfde wijze uit te voeren, met dit verschil dat er twee vervangende lijnen moeten worden bepaald, namelijk één met en één zonder de vertragsingsverliezen. De ζK_v waarde volgt dan uit het verschil van de twee karakteristieken, zie fig. 37.

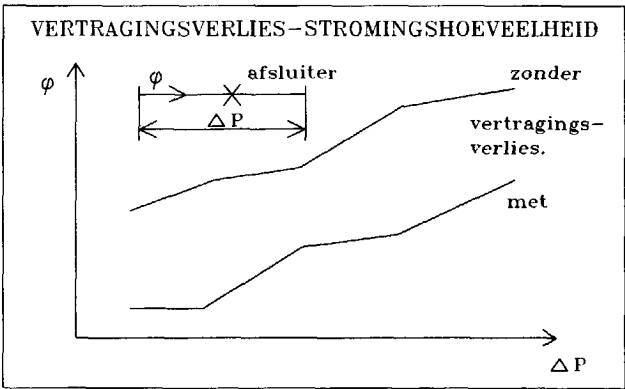


fig. 37 Bepaling vertragsingsverlies volgens splinefuncties.

Voor de inertantieterm geldt de onderstaande rekenregel.
Ook deze term is bij de splinefuncties direct meegenomen.

$$\Delta P = I_v \dot{\varphi}_v = I_v (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2)$$

Met $\dot{\varphi}_1 = \frac{\Delta P}{I_1}$ en $\dot{\varphi}_2 = \frac{\Delta P}{I_2}$ wordt $\Delta P = I_v \left(\frac{\Delta P}{I_1} + \frac{\Delta P}{I_2} \right)$

of
$$\frac{1}{I_v} = \frac{1}{I_1} + \frac{1}{I_2}$$

Met $I = \frac{\rho L}{A}$ en dus $\frac{1}{I} \propto \frac{D^2}{L}$ geldt voor n buizen:

$$\frac{D_v^2}{L_v} = \sum_{j=1}^n \left(\frac{D^2}{L} \right)_j$$

Aan beide rekenregels is niet gelijktijdig te voldoen zodat bij gebruik hiervan per hiërarchisch niveau een keuze gemaakt dient te worden.

Seriële buizen

Bij verschillende buizen die in elkaars verlengde liggen, serieel, is het uitgangspunt dat de volumestroom door beide buizen gelijk blijft, zie fig. 38.

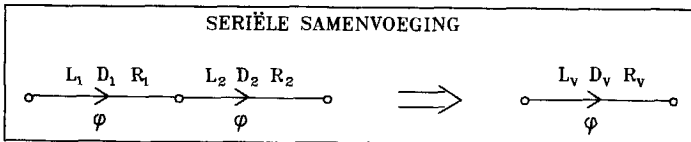


fig. 38 Samenvoegen van seriële buizen.

De term voor de vervangende wandwrijving luidt als volgt:

$$\left(\frac{\lambda L}{D^5} \right)_v = \sum_{j=1}^n \left(\frac{\lambda L}{D^5} \right)_j$$

Evenzo geldt voor de inertantieterm:

$$\left(\frac{L}{D^2} \right)_v = \sum_{j=1}^n \left(\frac{L}{D^2} \right)_j$$

Ook hier geldt de opmerking dat aan beide rekenregels niet gelijktijdig te voldoen is.

Het ontwikkelde algoritme voor de bepaling van de vervangende weerstandskarakteristiek is opgenomen in het hulp-programma WEERSTAND. Dit programma bepaalt weer met de splinefuncties voor n stromingssituaties op soortgelijke wijze het weerstandsverloop, afhankelijk van de volumestroom.

Het grote voordeel van een dergelijke aggregatie-methode is, dat er naast het behoud van hydraulische equivalentie ook een (enorme) besparing in tijd en arbeid behaald wordt indien dit computermatig gebeurt. Het handmatig opstellen van vereenvoudigde schema's vereist niet alleen veel kennis en ervaring van een net, maar is bovendien enorm arbeidsintensief.

II.6.2 De opdeling in subsystemen

Al eerder is de aanwezige hiërarchie in distributienetten ter sprake geweest. Het indelen van het gehele distributienet in subsystemen die volgens relaties aan elkaar verbonden zijn, is een decompositietechniek (lit. 16 en 17), waarbij de hiërarchische structuur van het net de basis is.

Verkleining van de dimensie wordt hier verkregen uit de kleinere subsystemen waarin het totaal is opgedeeld. De interconnectie tussen de subsystemen wordt bij decompositie beschreven.

Decompositie herrangschikt de relaties en/of variabelen zodanig, dat de oorspronkelijke matrices nu matrices worden met vooral niet-nulelementen in blokken op de hoofddiagonaal. Het voordeel van deze methode is, dat er naast een rekentijdverkortening geen buizen weggelaten worden, zodat geen informatieverlies optreedt, tenzij zwak van elkaar afhingende subsystemen worden verwaarloosd.

Stel een totaalsysteem met een n dimensionale toestandsruimte, kunnen we splitsen in m subsystemen, zoals fig. 39 dit laat zien.

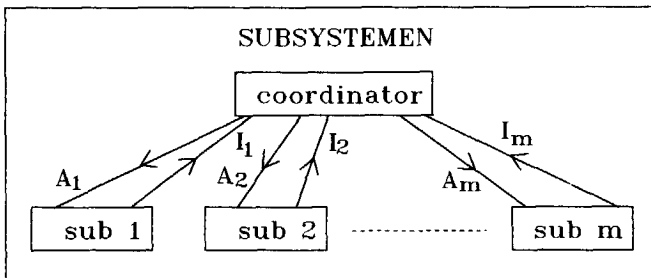


fig. 39 De subsystemen, de informatie- en actiestromen.

In dit geheel heeft de coördinator de uitwisselingsfunctie om de lokale informatie I_1 te ontvangen en vervolgens hierop te reageren met een actie A_1 .

De coördinator weet dan ook welke uitvoer van een subsysteem als invoer dient voor een ander sub-systeem, hij fungeert hiermee als intermediair.

Ter illustratie voor de ordegraote van de te behalen winst in rekentijdverkorting het volgende voorbeeld.

Stel een systeem heeft een dimensie n , dan is de rekentijd evenredig met n^3 (lit. 18). Wordt het totaal opgedeeld in m subsystemen met n_i de dimensie van de toestandruimte van het i^e subsysteem (met $i=1,2,\dots,m$), dan is de orde van grootte voor de rekentijd van het totaal evenredig met:

$$\sum_{i=1}^m n_i^3 + \text{coördinatietijd}$$

Ter illustratie in cijfers:

dimensie $n = 600$, dan is de rekentijd evenredig met $(600)^3$ ofwel $6^3 \cdot 10^6$.

Is nu $m = 6$ het aantal subsystemen met ieder de dimensie $n=100$, dan is de rekentijd evenredig met $6 \cdot 100^3$ ofwel $6 \cdot 10^6$.

De reductie in rekentijd is hiermee duidelijk, het rekenen gaat ongeveer 36 keer sneller (exclusief de coördinatietijd).

Opmerking

Voor de drie hiërarchische niveaus in een distributienet worden de buisstromingen gekenmerkt door het feit dat de gemiddelde snelheid afneemt van het primaire niveau naar de leveringsniveaus terwijl de betekenis van de fluctuaties op de gemiddelde waarde juist sterker wordt op de leveringsniveaus.

Zoals reeds eerder vermeld wordt het leveringsniveau gekenmerkt door een uiterst lage gemiddelde snelheid met sterke fluctuaties. Het gevolg hiervan is dat de inertantie- (of impuls)term op dit niveau kan domineren.

Fig. 40 toont een schematische voorstelling van de hiërarchische niveaus.

De plaats en de lokatie van een subsysteem in de systeembeschrijving van het distributienet is afhankelijk van het hiërarchisch niveau.

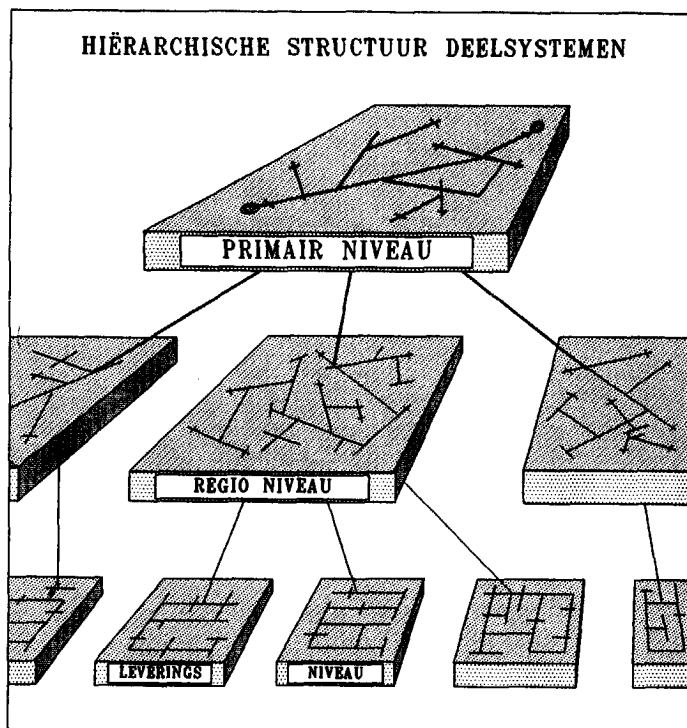


fig. 40 De hiërarchische niveaus in een distributienet.

Uit systeemtheoretisch oogpunt ontstaat nu een hiërarchisch besturingsprobleem, waarbij de rol van informatie uitwisseling groot is bij het goed op elkaar af stemmen van de deelinformatiestromen.

Bij het dynamisch doorrekenen van deze niveaus zal de te kiezen tijdstapgrootte voor zowel de invoergegevens als de rekenstap afhankelijk zijn van het "inzoom" niveau en dus van de tijdconstanten van de processen die overheersen.

In- en uitvoerstapgrootten en de rekenstapgrootte zullen dus aan het niveau gerelateerd moeten zijn. Zo dienen bij kwaliteitsbeschouwingen op het leveringsniveau de invoergegevens voor de afnamen een continu fluctuerend karakter te hebben. De tijdbasis voor de invoer zou hier eventueel op een minuut gekozen kunnen worden, afhankelijk van de beschouwde kwaliteitsparameters zoals troebeling.

Totaal anders ligt dit op het primaire en regionale niveau; hier kunnen invoerstepgrootten van één uur respectievelijk één kwartier gekozen worden.

Bij een afzonderlijke beschouwing van een wijk (leveringsniveau) moet een en ander wel in zijn totaliteit gezien worden, omdat de randvoorwaarden voor dit niveau uit het regionale en/of het primaire niveau volgen.

De benadering vanuit de subsystemen op het laagste niveau naar het hoogste niveau geeft betere mogelijkheden om een optimale distributie te realiseren dan andersom. Immers, nu kan - uitgaande van de vermogensvraag (stromingen*drukken) op leveringsniveau - een optimaal besturingssysteem, afgestemd op de behoefte, worden ontworpen.

De inrichting en regeling van de distributie zou er dan uit kunnen zien als in fig. 41 schematisch is weergegeven.

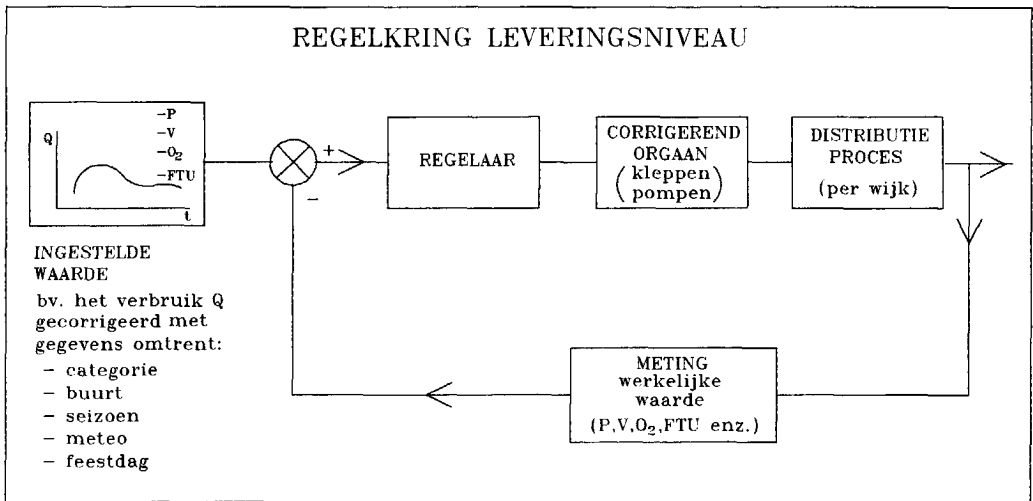


fig. 41 Regelkring van een aantal wijken.

Voor ieder niveau kan een aantal regelkringen opgenomen zijn met de daarin benodigde corrigerende organen zoals (telemetrisch

bediende) afsluiters, spuumogelijkheden, aanjagers, reservoirs en dergelijke. Deze lokale regelkringen kunnen vervolgens met "masterregelaars" op hogere niveaus in verbinding staan. Verdere studie op dit onderwerp verdient sterke aanbeveling!

Opmerkingen

De meest effectieve vorm van decompositie is het kunnen construeren van "disjuncte" subsystemen. Hieronder wordt verstaan het vormen van subverzamelingen van relaties die geen overeenkomende variabelen bevatten, zodat ieder subsysteem onafhankelijk kan worden behandeld, (eventueel ook het weglaten van zwakke koppelingen tussen subsystemen).

Over decompositie voor niet-lineaire systemen, zoals bij leidingnetten het geval is, is weinig concreets bekend. Het nodige onderzoek zal nog moeten worden gedaan opdat een nog grotere verkorting van de rekentijd verkregen kan worden (onderzoek vindt thans plaats aan de Universiteit Twente lit. 19).

Zoals reeds gezegd bij de behandeling van de stroming door een buis, zal op primair niveau de inertantie(impuls)term een zeer kleine rol spelen. Op leveringsniveau daarentegen kan dit een grote zijn. Bij het doorrekenen van het totale systeem (dus primair, regionaal en leveringsniveau) is het aan te raden om dit op alle niveaus volgens eenzelfde aanpak te doen, zodat ook op het primaire niveau de inertantieterm wordt meegenomen.

II.7 IDENTIFICEERBAARHEID

Bij toepassing op nieuw aan te leggen netwerken kunnen de parameterwaarden voor wandruwheid en vertragingverliezen overeenkomen met waarden uit de literatuur c.q. van de leveranciers.

Dit ligt echter totaal anders bij bestaande netten. Hier speelt doorgaans de problematiek van het goed schatten van de k - en ζ -waarden voor weerstanden van afsluiters en andere vertragingverliezen.

De mogelijk veranderde weerstandswaarde ten gevolge van sedimentatie in buizen, de opbouw van de deklaag aan de buiswand in het bijzonder op leveringsniveau, maken het schatten noodzakelijk. Dit kan vooral het geval zijn wanneer daarbij in de schematisatie vereenvoudigd is door weglating van buizen (vaak zal de invloed van deze buizen niet goed bekend zijn). De vraag die altijd gesteld dient te worden is in welke mate de modelvorming en de daaruit verkregen resultaten nog met de werkelijkheid overeenstemmen. Of: hoe goed beschrijven de modelvergelijkingen het proces en hoe uniek is de verzameling invoergegevens.

We raken hier de problematiek van identificeerbaarheid en identificatie.

Fig. 42 geeft schematisch het probleem weer.

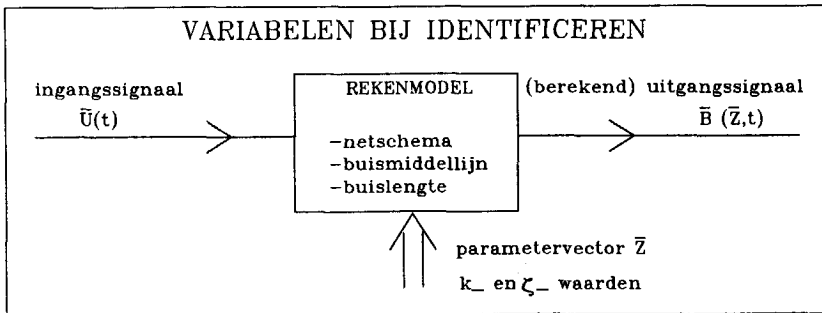


fig. 42 Variabelen bij identificeerbaarheid.

Voor een netwerk is \bar{z} de parametervector volgens $\bar{z} = (z_1, \dots, z_n)$, met n de dimensie van de parameterruimte Z . De elementen z_i zijn de k - en ζ -waarden.

Stel: we hebben voor een netwerk een verzameling modellen (modelverzameling) met dezelfde structuur maar met verschillende waarden voor de elementen van de parametervector. De structuur van de modellen is dezelfde als geldt dat de configuratie dezelfde is en als de buizen dezelfde lengten en middellijnen hebben. De vraag is dan welk model uit de modelverzameling het juiste is, ofwel welke parameterwaarden voor \bar{z} de juiste zijn?

Een model noemen we identificeerbaar indien op basis van een bekend ingangssignaal $\bar{u}(t)$, metingen en het berekende uitgangssignaal $\bar{B}(z,t)$, de parameter \bar{z} te bepalen is.

Bij identificatie gaat het accent uit naar het vinden van de correcte waarden van de elementen van de ingevoerde parametervector \bar{z} .

In lit. 20 en 21 wordt onderscheid gemaakt tussen "globale" en "lokale" identificeerbaarheid. Globale identificeerbaarheid is een sterke eis waaraan voor dit probleem niet is te voldoen, doordat het uit praktische overwegingen onmogelijk is voor iedere buis de weerstanden uit metingen te bepalen. Er kan daarom nooit voldaan worden aan globale identificeerbaarheid en dus niet aan de één-éénduidige relatie: "bij een gegeven druk- en stromingspatroon in een net behoort slechts één unieke netconfiguratie met parametervector \bar{z} en andersom".

Een zwakkere eis is lokale identificeerbaarheid. De parametervector \bar{z} is lokaal identificeerbaar als de verschillende elementen van de modelverzameling een uitgangssignaal geven dat goed bevonden kan worden en waarbij geldt dat de waarde van elke parameter in de omgeving ligt van de werkelijke waarde.

(Hierbij is het probleem te kunnen zeggen dat de waarde in de omgeving van de werkelijke waarde ligt!)

Wiskundig is het probleem:

indien \hat{z}_1 de geschatte waarde is en $\bar{B}(\hat{z}, t)$ het tijdsafhankelijke uitgangssignaal bij \hat{z} en het ingangssignaal $\bar{u}(t) \in U$ is, dan is bovenstaande als volgt te beschrijven:

- De parameter z_1 uit \bar{z} is **globaal identificeerbaar** voor de ingangsverzameling U dan en slechts dan als voor bijna alle $\bar{z} \in Z$ geldt:

$$\left. \begin{array}{l} \hat{\bar{z}} \in Z \\ \hat{\bar{B}}(\hat{\bar{z}}, t) \equiv \bar{B}(\bar{z}, t), \quad \forall t \in \mathbb{R}^+, \forall \bar{u} \in U \end{array} \right\} \Rightarrow \hat{z}_1 = z_1$$

- De parameter z_1 is lokaal identificeerbaar voor de ingangverzameling U dan en slechts dan als er voor bijna alle $\bar{z} \in Z$ een omgeving $v(\bar{z})$ bestaat, zodanig dat:

$$\left. \begin{array}{l} \hat{\bar{z}} \in v(\bar{z}) \subset Z \\ \hat{\bar{B}}(\bar{z}, t) \equiv \bar{B}(\bar{z}, t), \quad \forall t \in \mathbb{R}^+, \forall \bar{U} \in U \end{array} \right\} \Rightarrow \hat{z}_1 = z_1$$

De vraag is, wat we met een identificatie willen bereiken. Wordt er geëist dat de afzonderlijke parameters van \bar{z} binnen zekere nauwkeurigheid de werkelijke fysische waarde hebben, of nemen we dit ruimer en kijken we naar het resultaat dat bereikt is met op zichzelf minder nauwkeurige, maar wel reële parameters? Dit laatste is het geval, we gaan daarom over op een methode die we "praktische identificatie" zullen noemen en die gebaseerd is op de "kleinste kwadraten methode".

Een en ander is opgenomen in het programma met gebruikmaking van een minimalisatieroutine.

II.7.1 De praktische identificatie

De te identificeren matrices van de vergelijkingen I en II zijn voornamelijk H en D, immers deze zijn weerstandsafhankelijk; voor A en E geldt dat deze afhankelijk zijn van de inertantieterm I zodat hier de gekozen middellijnen en lengten te identificeren zijn.

In lit. 22 wordt een methode aangegeven waarmee dit soort problemen aangepakt kan worden, namelijk identificatie op de correctiefactoren van de totale weerstanden.

Om deze methode toe te passen moeten we eerst de totale weerstandswaarden R_t uitrekenen om ze vervolgens te identificeren met correctiefactoren.

Een (klein) nadeel van deze methode is dat de gevonden gecorrigeerde totale weerstanden nu weer in nieuwe (fictieve) L, D, ζ en/of k-waarden omgezet moeten worden. De manier waarop dit gedaan kan worden, is niet éénduidig en vereist kennis van het net, omdat bij deze methode de werkelijke waarden van de parameters uit het oog verloren kunnen worden.

Omdat de D, L, ζ - en k-waarden apart worden ingevoerd, is er een alternatieve en directere methode te identificeren op correctiefactoren van deze afzonderlijke grootheden.

De geïdentificeerde correctiefactoren kunnen vervolgens weer worden ingevoerd voor het maken van nieuwe berekeningen.

Beide methoden kunnen worden toegepast doordat uitspraken omtrent identificeerbaarheid van de totale weerstanden respectievelijk de afzonderlijke parameters ook gelden voor de correctiefactoren hiervan.

Het gaat hier om een kleinste kwadraten schatting, gebaseerd op een voldoende aantal nauwkeurige metingen op juiste (representatieve) plaatsen in het net.

Het probleem is dus de functie
$$F(\bar{Z}, t) = \sum_{j=1}^m \left[W_j \left(B(\bar{Z}, t)_j - M_j \right) \right]^2$$

te minimaliseren over een gekozen periode op meer tijdstippen binnen het gewenste simulatieinterval.

Voldaan wordt aan de eis voor het vinden van het minimum namelijk:

$$\frac{\partial F(\bar{Z})}{\partial \bar{Z}} = 0 \quad \text{en} \quad \frac{\partial^2 F(\bar{Z})}{\partial Z^2} > 0$$

Met dit gevonden minimum kunnen de afzonderlijke grootheden zoals k-waarden, of de totale weerstanden R_t gecorrigeerd worden volgens:

$$R_{t_i \text{nieuw}} = C_i R_{t_i \text{oud}}$$

of:

$$k_{i \text{nieuw}} = C_i k_{i \text{oud}} \quad (\text{met } i=1, \dots, n_{\text{buis}})$$

waarbij:

C_i = correctiefactor voor buis i .

M_j = meetwaarde voor het j^* meetpunt, met $j=1, \dots, m$ (aantal metingen).

B_j = berekende waarde voor het j^* meetpunt (druk of snelheid).

W_j = weegfactor (bijvoorbeeld nauwkeurigheid van de opnemer).

De op deze wijze gecorrigeerde waarden geven de beste overeenkomsten. In het hulpprogramma SCHAT wordt deze methode toegepast (lit. 23).

II.8 BEPALING REISTIJDEN EN TRAJECTEN

Op basis van de door DYNA berekende stromingen en drukken is het nu mogelijk om de volgende kwaliteitsaspecten te modelleren:

- reistijden: de tijdsduur tussen de passage van een waterdeeltje van een instroomknoop tot een afnameknoop;
- herkomst: de watersoort ter plaatse van een afnameknoop gerelateerd aan de instroomknoop;
- fractie van de instroom: het percentage van de hoeveelheid water die de instroomknoop geleverd heeft aan de afnameknoop;
- trajecten van stromingen: verzameling van opeenvolgende doorstroomde buizen die door de beschouwde fractie(s) is (zijn) doorstroomd;
- parameterverloop: het verloop van de beschouwde parameterwaarde (bijvoorbeeld troebelings) over het traject.

(De kwaliteitsaspecten zijn in bijlage 3, onder "Begrippen en Definities" uitvoeriger beschreven).

De berekeningen van bovengenoemde aspecten zijn opgenomen in het facultatieve hoofdprogramma QUALI (lit. 24). Voor het kunnen bepalen van deze kwaliteitsaspecten is het noodzakelijk dat waterdeeltjes zo continu mogelijk in de tijd gevolgd kunnen worden; dat vereist een zo klein mogelijke uitvoerstap van DYNA. De twee berekeningsmethoden zijn:

A. "Met de tijd en de stroming mee" (deelprogramma REISMEE);

B. "Tegen de tijd en de stroming in" (deelprogramma "REISTEGEN").

Met methode A is op snelle wijze de doorstroming in het gehele net te beoordelen en vast te stellen waar zich lange reistijden van deelstromen voordoen om een nadere diagnose uit te voeren. Na het bepalen van de probleemgebieden is het dan mogelijk met methode B de lokale problematiek gedetailleerd te onderzoeken, zoals:

- de ontvangst van het water per knoop in reistijd;
- alle mogelijke trajecten met bijbehorende fracties;
- de herkomstbepaling van welke instroom het afgenomen water afkomstig is;
- de veranderingen van kwaliteitsparameters langs de gevolgde trajecten.

Voor de samenhang tussen reistijd en verblijftijd het volgende.

De verblijftijden van water in de afzonderlijke buizen en reservoirs, voorkomend in een traject, worden gesommeerd tot de totale reistijd, waarmee dus een traject gekoppeld is aan een stromingsfractie en een reistijd.

II.8.1 De verblijftijdsbepaling

Allereerst voor het kunnen rekenen een aantal veronderstellingen:

- in de buizen heerst een "propstroming", waarbij tijdens het transport geen menging voorkomt tussen de onderlinge fracties. Dit geldt eveneens voor de doorstroming van watertorens en reservoirs;
- in de knooppunten vindt volledige menging plaats.

Voor de verblijftijdsbepaling is het heersende snelheidspatroon in de buizen essentieel. Zoals reeds genoemd bij de bepaling van de stromingen, is de keuze van de invoer- c.q. rekenstapgrootte (in DYNA) afhankelijk van het beschouwde hiërarchische niveau en is

hiermee gerelateerd aan het heersende snelheidspatroon. Fig. 43 geeft de snelheidskarakteristieken aan zoals die voorkomen op de verschillende niveaus.

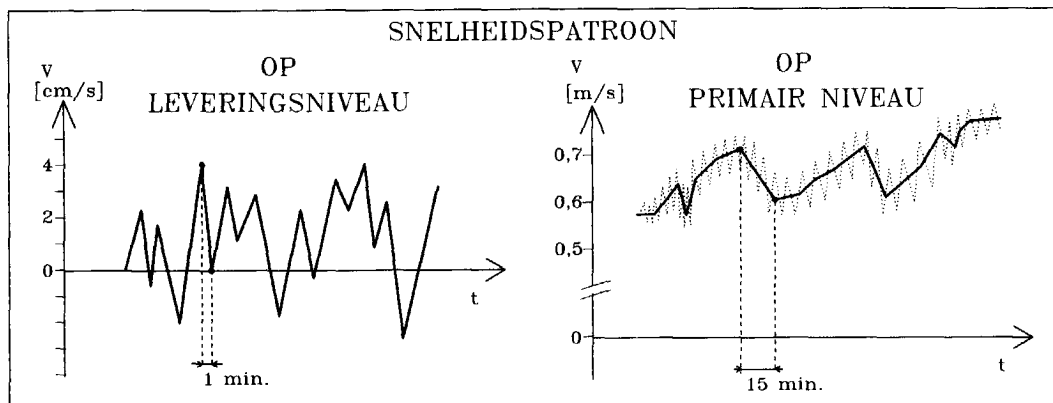


fig. 43 Snelheidskarakteristieken (fig. 33).

Op het leveringsniveau vindt de fijnste verdeling plaats via een fijnmazig net naar de afnemers. Het karakter van de stromingen op dit niveau wordt overheerst door de fluctuaties op tijdbasis van minuten, waarbij de amplitude relatief groot is. De gemiddelde stromingssnelheden zijn in het algemeen zeer laag (tot enkele cm/s).

Voor de bepaling van de reistijden van stromingsfracties zijn de verblijftijden in de doorlopen buizen voor elk bepaald traject van belang.

Het is het dus noodzakelijk alle mogelijke trajecten te kunnen bepalen. Een traject kan ten aanzien van reistijd en fractie op een viertal manieren opgebouwd zijn, namelijk:

- korte reistijden met kleine fractie;
- korte reistijden met grote fractie;
- lange reistijden met kleine fractie;
- lange reistijden met grote fractie.

Dit heeft gevolgen voor de gemiddelde reistijd en zijn spreiding, dus ook voor de uiteindelijke beoordeling van de netdoorstroming. De gemiddelde reistijd is te bepalen volgens:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n A_i * T_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (\text{n is het aantal trajecten en A de fractiegrootte})$$

Voor de berekening van de verblijftijd zijn de volgende aspecten die afzonderlijk worden behandeld, van belang:

- de fractiebepaling over een knoop;
- het stromingspatroon in een buis (of buffer);
- het doorlopen traject.

De fractiebepaling over een knoop

Door de veronderstelling van volledige menging in een knoop kan er een evenredige verdeling worden aangenomen van de waterfracties die op een knooppunt aankomen over de afvoerende buizen.

Voor het berekenen van de doorstromende fractie wordt gebruik gemaakt van de volumestromen in de leidingen die op een knooppunt zijn aangesloten. Voor REISMEE is de berekening als volgt, zie hiervoor fig. 44.

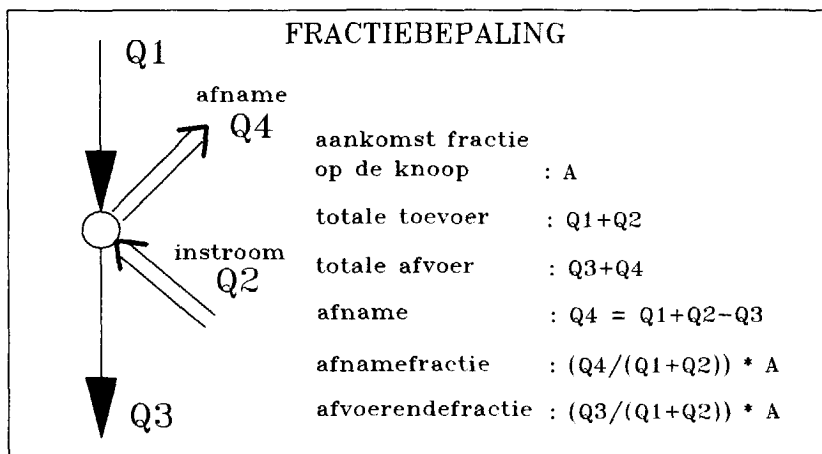


fig. 44 Fractieberekening op een knooppunt (REISMEE).

Toelichtingen bij fig. 44:

- de som van alle toevoeren naar een knoop (volumestromen in de toevoerende buizen eventueel vermeerderd met een instroom) is gelijk aan de som van alle afvoeren (volumestromen in afvoerende buizen eventueel vermeerderd met een afname);
- de instromende fractie A wordt verdeeld over de afvoerende buizen en de eventuele aanwezige afname. De fractie van een afvoerende volumestroom (afvoer in buis of afname) is evenredig met de grootte van deze volumestroom.

Voor REISTEGEN geldt dezelfde redenering, alleen wordt daarmee de fractie verdeeld over de toestromende buizen in plaats van de afstromende.

In fig. 45 is aan de hand van een voorbeeld geïllustreerd hoe de verdeling van de fracties over de knooppunten plaatsvindt in een leidingnet.

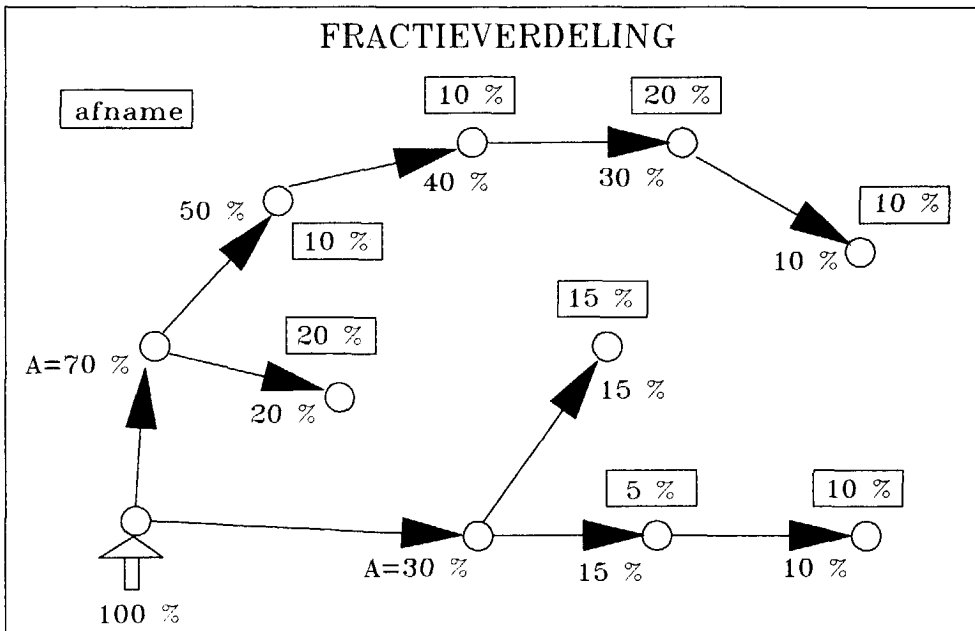


fig. 45 Aankomstfractieverdeling over de knopen in een leidingnet met REISMEE.

Het stromingspatroon in een buis

De bepaling van de verblijftijd geschiedt met behulp van het stromingspatroon.

Per definitie is de verblijftijd in een buis met lengte L , waarin een tijdsafhankelijke snelheid $v(t)$ heerst, de integratietijd

$T = t_{uit} - t_{in}$ volgens fig. 46.

$$L = \int_{t_{in}}^{t_{uit}} v(t) dt$$

t_{in} is instroomtijdstip
 t_{uit} is uitstroomtijdstip.

Hierbij zijn drie situaties te onderscheiden:

- de stromingsrichting is constant;
- de stromingsrichting verandert éénmaal;
- de stromingsrichting verandert veelvuldig.

De stromingsrichting is constant

De snelheid is zodanig dat de stromingsrichting constant blijft. (fig. 46). De volgende knoop in het traject is de aankomstknop aan het uiteinde van de buis. Gedurende de verblijftijd in de buis heeft de fractie de gehele lengte L doorstroomd.

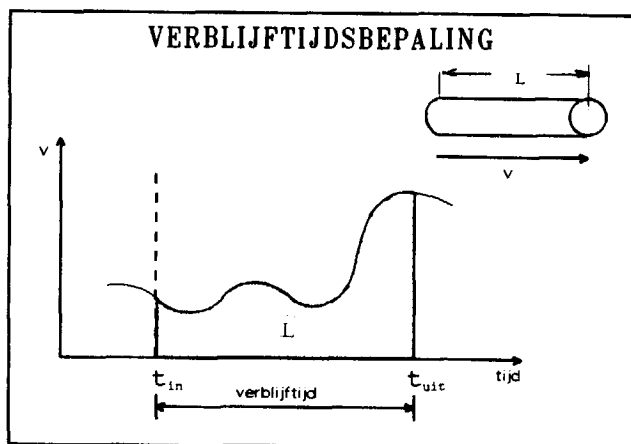


fig. 46 Stromingspatroon blijft één richting.

De stromingsrichting verandert éénmaal

De snelheid wisselt slechts éénmaal van teken tijdens het verblijf in de buis, waarmee de stroomrichting dus omkeert, zie fig. 47. De integraalberekening begint op t_{in} en loopt door totdat de integraal gelijk is aan nul, namelijk de doorlopen buislengte. Op het moment dat de waarde van de integraal gelijk is aan nul, is er een bepaalde tijdsperiode verstreken. De grootte van deze tijdsperiode is dan gelijk aan de verblijftijd in de buis namelijk $t_{in} - t_{uit}$.

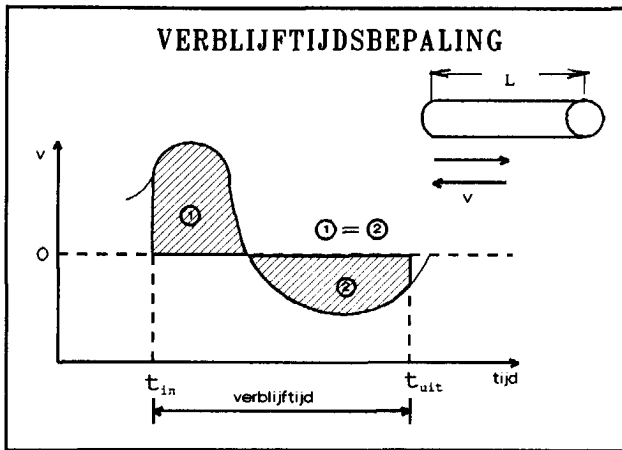


fig. 47 Stromingsrichting wisselt.

Het gearceerde oppervlak in fig. 47 (de som gelijk aan nul) komt dan overeen met de waarde van de integraal.

De volgende knoop in het traject is nu weer de beginknoop van dezelfde buis. Gedurende de verblijftijd heeft de fractie dus een gedeelte van de buis doorlopen.

De stromingsrichting verandert veelvuldig

De snelheid wisselt veelvuldig van teken, waardoor de stromingsrichting telkens omkeert (pendelen, zie fig. 48). Eigenlijk is dit een bijzondere situatie van het tweede geval. De fractie zal uiteindelijk één van de uiteinden van de buis bereiken. De integraal is dus of gelijk aan nul of gelijk aan L .

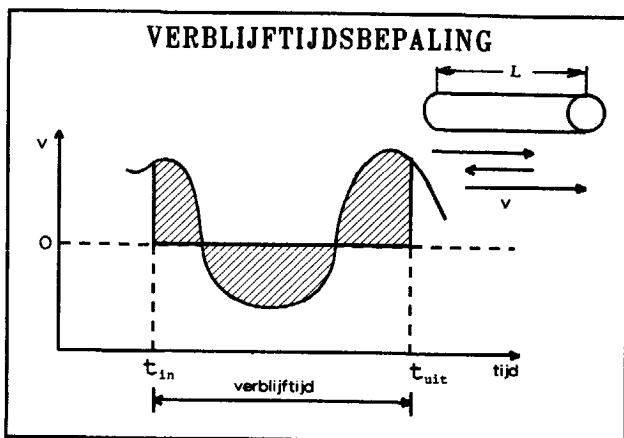


fig. 48 Stromingsrichting wisselt meerdere keren.

De integraalbeplating van de drie situaties, dus de bepaling van het oppervlak onder de snelheidsfunctie, gebeurt numeriek met de trapeziumregel. Hierbij corresponderen de rekentijdstappen met de basispunten volgens fig. 49.

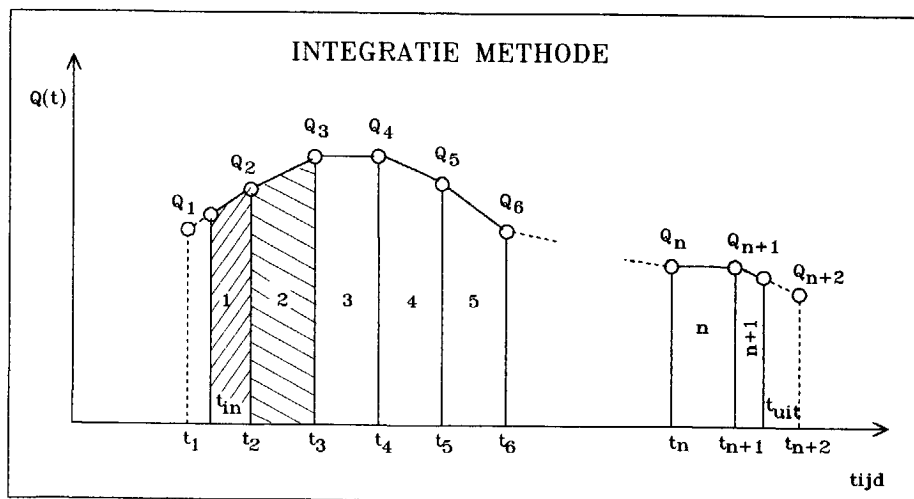


fig. 49 Numerieke integraal berekening.

Opmerking

De verblijftijdsbepaling in een reservoir of watertoren gaat op analoge wijze namelijk volgens (fig. 50):

$$Vt_{in} = \int_{t_{in}}^{t_{uit}} \varphi(t) dt$$

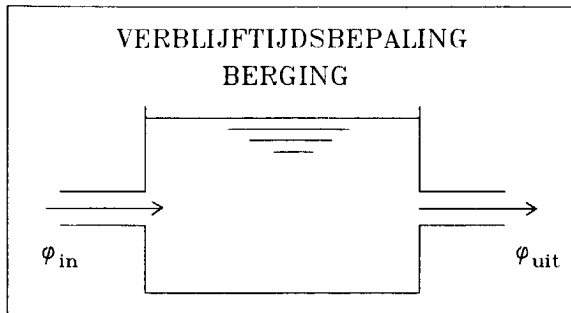


fig. 50 Strooming door reservoir.

Hierin is de verblijftijd weer het verschil in tijd tussen $t_{uit} - t_{in}$ voor een fractie.

V is het aanwezige watervolume in het reservoir op het tijdstip van instromen van een fractie.

φ_{uit} = de uitgaande volumestroom.

De berekening gaat als volgt:

- de waterfractie komt aan via de toevoerleiding op het tijdstip t_{in} ;
- de hoeveelheid water in de buffer kan bepaald worden aan de hand van de waterdruk, die correspondeert met de hoogte. Het volume is dus een functie van de waterstand. Op tijdstip t_{in} is de waterdruk bekend (uitvoer van DYNA) en dus ook het watervolume in de buffer zelf;
- in DYNA is de afvoerstream uit de buffer berekend. Hiermee is te bepalen hoe lang het duurt voordat het volume V uit de buffer is gestroomd. Dit gebeurt op dezelfde manier als beschreven bij het berekenen van de verblijftijd in een buis.

Het doorlopen traject

Het bepalen van de trajecten gebeurt aan de hand van de volumestromen in de desbetreffende buizen die aan knopen, voorkomend in dat traject, vastzitten. Hiervoor zijn twee mogelijkheden:

- afstromende buizen; dit betekent dat de volumestroom in de buis van het knooppunt af gericht is;
- toestromende buizen; dit betekent dat de volumestroom in de beschouwde buis naar het knooppunt toe gericht is.

Voor de trajectenbepaling in REISMEE wordt gebruik gemaakt van de afstromende buizen op een knooppunt en in REISTEGEN van de toestromende buizen. Naast de afstromende/toestromende buizen wordt ook de verblijftijdsberekening in een buis gebruikt voor de trajectbepaling. Hierdoor wordt namelijk de volgende knoop in een traject bepaald.

De trajectbepaling gaat als volgt (fig. 51):

- op een knooppunt wordt een afstromende/toestromende buis beschouwd;
- uit de verblijftijdsberekening volgt het volgende knooppunt in het traject;
- voor dit volgende knooppunt moeten twee vragen beantwoord worden: is er een afname en zijn er af- of toestromende buizen aanwezig;
- de trajectbepaling gaat verder als er een af- of toestromende buis op dit knooppunt aanwezig is.

Door op elk knooppunt alle afstromende/toestromende buizen mee te nemen, zullen alle mogelijke trajecten vanuit het beginknooppunt bepaald worden. Hiermee is de "herkomst" van het afgenomen water in een willekeurige afnameknoop bepaald.

Voor REISMEE is het beginknooppunt een instroompunt en voor REISTEGEN is dus het instroomknooppunt een willekeurig gekozen knoop in het net.

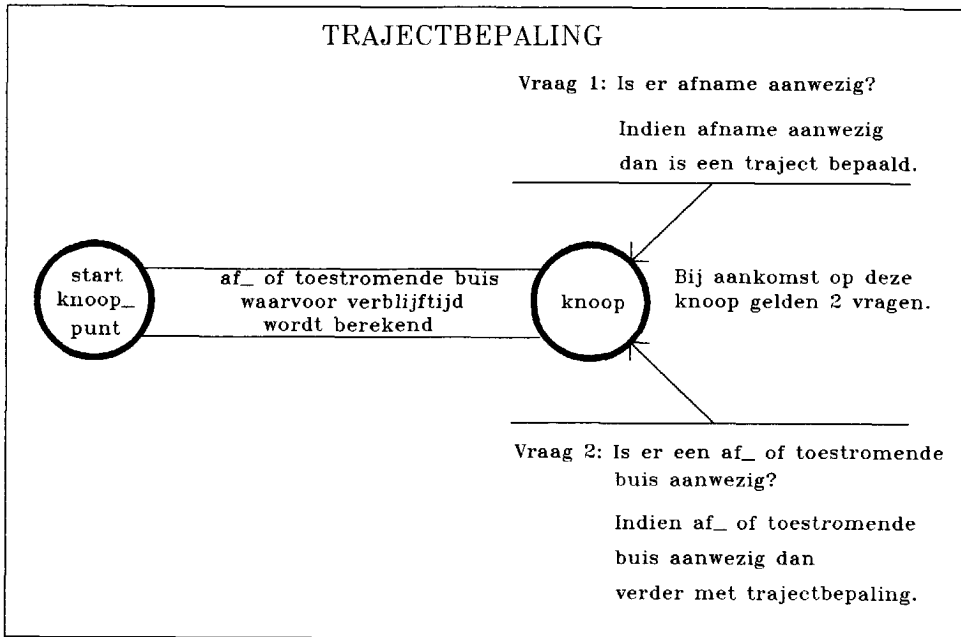


fig. 51 Trajectbepaling REISMEE (afstromende buis) en REISTEGEN (toestromende buis).

De basis voor de trajectbepaling is de ingevoerde geometrie. In alle buizen wordt de stromingsrichting bepaald op het aankomst-tijdstip. Ook wordt de totale toestromende hoeveelheid vastgesteld. Vervolgens wordt een afstromende hoeveelheid opgezocht. De fractie die door deze buis gaat, is gelijk aan de volumestroom, gedeeld door de totale toestromende hoeveelheid.

Indien geen afstromende buis aanwezig is, wordt er één knoop in dat traject teruggedaan en wordt vervolgens op deze knoop naar een afstromende buis gezocht, enzovoort.

Ter beperking van rekentijden is een afbreekcriterium opgenomen. Dit is een minimumgrenswaarde voor de fractie (van de instroom of de afname) in een buis tijdens de trajectbepaling. Indien de fractie in de buis kleiner wordt dan het criterium, worden verdergaande trajecten via deze buis niet meer bepaald. Een gebruikelijke waarde is 0,01 %.

Door dit criterium groter te kiezen, wordt de rekentijd korter, echter wel met als gevolg een kleiner getraceerd percentage van de totale instroomhoeveelheid. Een kleiner criterium daarentegen heeft het tegenovergestelde tot gevolg.

Bovenstaande uitleg is weergegeven in fig. 52, waarin is aangegeven hoe de verschillende theorieën in elkaar passen (REISMEE).

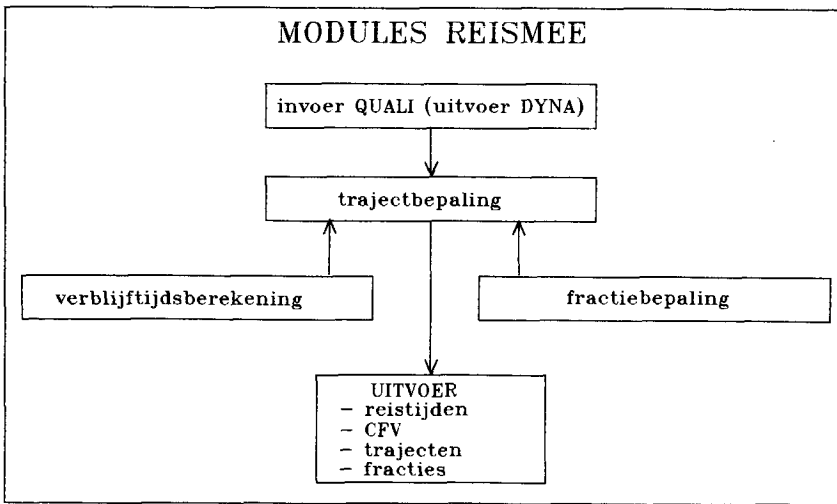


fig. 52 REISMEE modules.

De uitvoer van het programma REISMEE levert de trajecten met de bijbehorende fracties en reistijden en de cumulatieve frequentieverdelingen (CFV) voor de uitstroom over het gehele net. Hieraan zijn verschillende beoordelingscriteria te koppelen, zoals:

- de verblijftijden bij de 50%- en bij de 95%-waarden van de CFV, wanneer respectievelijk 50% en 95% van het ingestroomde water het net heeft verlaten;
- de steilheid van de CFV-kromme die ook een maat is voor de gemiddelde verblijftijd.

Voor REISTEGEN is er nog een extra module, namelijk de parameterberekening over een traject (fig. 53).

Ook hier kan de ontvangst van het water in een knoop cumulatief uitgezet worden, evenals de herkomst van het afgenomen water en de spreiding in reistijden.

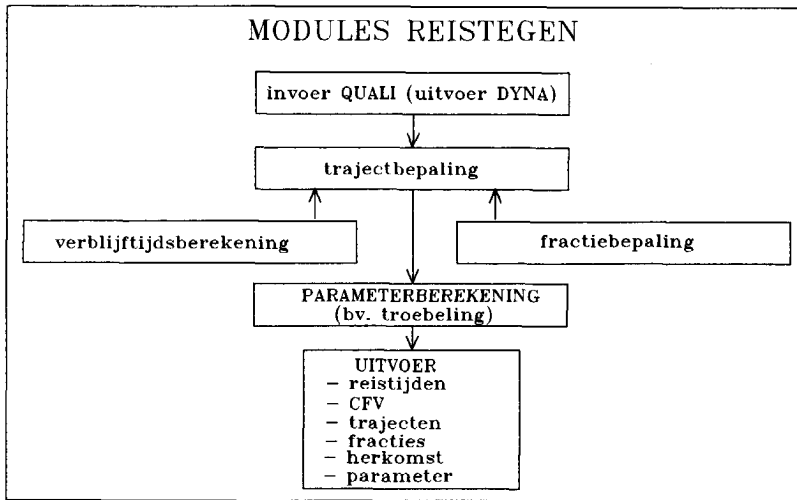


fig. 53 De REISTEGEN modules.

II.8.2 Het kwaliteitsverloop en de herkomstbepaling van het water

Bij het volgen van het verloop van een kwaliteitsparameter in een traject speelt de interactie tussen water en buismateriaal een belangrijke rol. Indien permeatie wordt verwaarloosd, dan zijn de parameters die tijdens het verblijf in het net beïnvloed kunnen worden bijvoorbeeld: troebeling (bij gietijzer), pH (bij beton), O₂, organische stoffen en het aantal micro-organismen (de biologie). Een en ander is sterk afhankelijk van de watersoort en de verblijftijd van het water in een buis.

Troebelingsberekening

Belangrijk is dat er een relatie tussen de verblijftijd in een buis en de verhoging van de troebelingswaarde geldt, afhankelijk van de middellijn van de buis. Als basis is hiervoor een lineaire afhankelijkheid aangenomen voor de troebelingsberekening in

REISTEGEN (fig. 54). In principe kunnen ook andere relaties hiervoor in aanmerking komen.

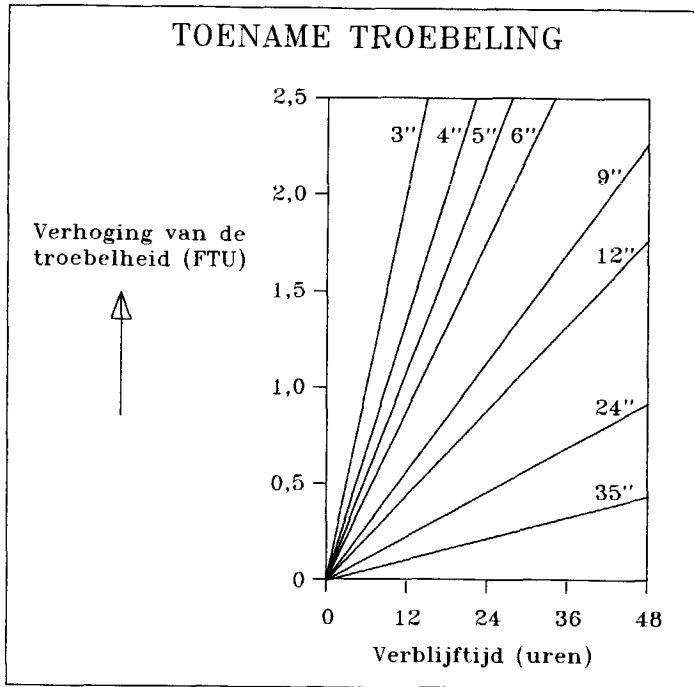


Fig. 54 Toename troebeling geldend voor een watersoort (bron lit.2).

Voor het berekenen van de troebeling in een knoop worden nu de volgende veronderstellingen gedaan:

- de toename van de troebeling is lineair afhankelijk van de verblijftijd in een gietijzeren buis, ongeacht de lengte van de buis (de Fe-afgifte-coëfficiënt is constant);
- de grootte van de toename van de troebeling per tijdseenheid is afhankelijk van de middellijn van de gietijzeren buis en van de watersoort die er doorheen stroomt;
- de toename van de troebeling vindt in dit voorbeeld alleen plaats door Fe- afgifte in gietijzeren buizen. Andere oorzaken van troebeling worden verwaarloosd, zoals opwerveling van los sediment, transportsediment en de vermeerdering van organismen.

De troebeling in een knoop kan worden berekend door het gewogen gemiddelde te nemen van de troebeling van alle aankomende fracties volgens:

$$\text{troebeling} = \frac{\sum_{i=1}^t \text{fractie (i)} * \text{troebeling (i)}}{\sum_{i=1}^t \text{fractie (i)}}$$

Waarin t het aantal aankomende trajecten is van instroompunt naar afnameknoop. Ter toelichting zie fig. 55.

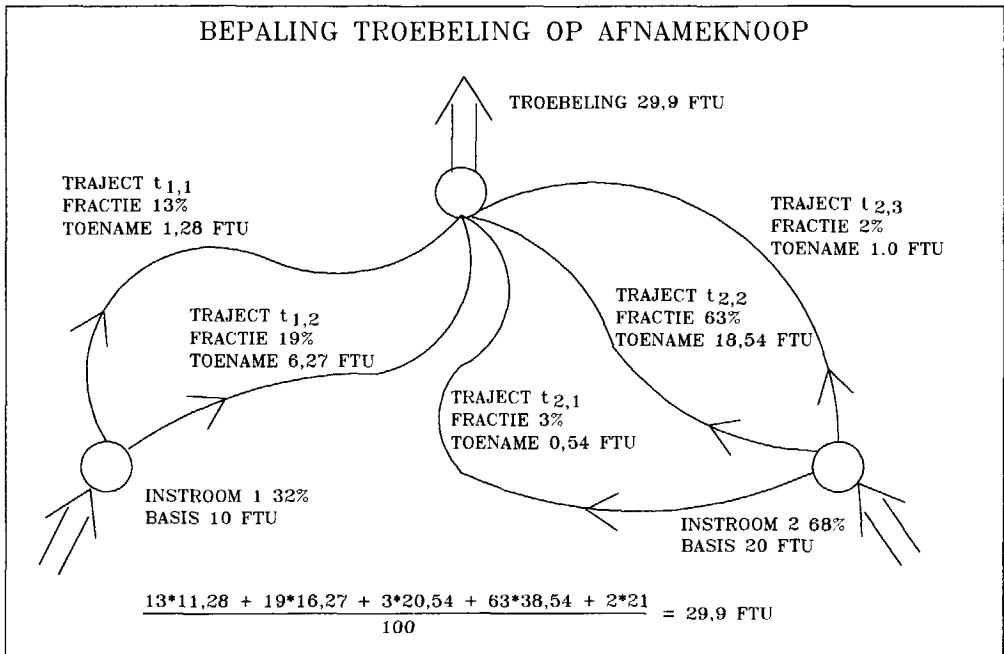


fig. 55 Berekeningsvoorbeeld troebeling in afnameknoop.

In dit hypothetische voorbeeld zijn vijf trajecten geschetst. Gesteld is de totale instroom op 100%; met de gegeven aanvangswaarden voor de troebeling op de instroompunten en de berekende toename per traject met de daarbij behorende fracties wordt dan de troebelingswaarde in de afnameknoop zoals in de figuur is weergegeven.

Voor het berekenen van de troebeling in een knoop moeten dus per traject de verblijftijden in de afzonderlijke buizen die een verhoging van de troebeling veroorzaken, bekend zijn.

Het bepalen van de verblijftijden in de buizen binnen een traject gebeurt door een codering te geven aan alle buizen. Deze codering geeft aan dat de desbetreffende buis een zekere tijdsafhankelijke toename van de troebeling veroorzaakt, die dan afhangt van het soort water. Er kunnen op deze manier 25 verschillende soorten buismaterialen worden aangegeven.

Soortgelijke berekeningen zijn mogelijk voor andere parameters zoals O_2 , Ca en dergelijke. De relaties van respectievelijk het O_2 -verbruik in de buizen en de afgifte of opname in water van Ca moet uit onderzoek bekend zijn.

In hoofdstuk II zijn in afzonderlijke stappen de methoden vastgelegd voor de bepaling van stromingen, drukken, reistijden, stromingstrajecten, enzovoort. Deze moeten nu samengevoegd worden tot één geheel in een voor de computer leesbare vorm. Voor de overzichtelijkheid gebeurt dit in afzonderlijke, op elkaar aansluitende modules. Zoals reeds eerder genoemd, is dit de laatste ontwikkelingsfase, namelijk van de wiskunde naar de programmeertaal.

In dit hoofdstuk worden de opbouw en de samenhang van de deelprogramma's van DYNASIM besproken.

Na de algemene inleiding volgt een beschrijving van het programma DYNASIM en van de belangrijkste samenstellende delen.

Vervolgens worden de subroutines en de relaties binnen de deelprogramma's besproken. Tenslotte volgt een beschrijving van de gegevensstromen in en tussen deze deelprogramma's waaronder de in- en uitvoer structuur.

III.1 ALGEMEEN

Het programma DYNASIM (DYNAMisch-SIMulatiemodel) is geschreven in de standaard programmeertaal FORTRAN 77 en is ontwikkeld op DEC-VAX computerapparatuur, werkend onder VAX/VMS. De ontwikkeling, de implementatie en het gebruik van DYNASIM werden uitgevoerd op een micro-computer (micro-VAX).

Door de keuze van deze standaard programmeertaal is het programma in principe niet gebonden aan genoemde apparatuur.

Voor het gebruik van een micro-computer is gekozen omdat de grote toepassings- en gebruiksmogelijkheden in combinatie met de sterk gedaalde prijzen dit besluit rechtvaardigen. Hierbij is de mogelijkheid van koppeling met de Leidingen- en Verbruikers Informatie-Systemen (LIS en VIS) van grote betekenis. Deze koppeling geeft niet alleen een grotere gebruikersvriendelijkheid, maar vooral een brede inzetbaarheid in de lijn wanneer over enkele jaren ook deze systemen operationeel zijn.

De opbouw van DYNASIM is, zoals reeds gezegd, modulair dat wil zeggen, de verschillende onderdelen en fasen van de rekenprocesser zijn ondergebracht in aparte deelprogramma's en subroutines.

Er is naar gestreefd de inzetbaarheid zo breed mogelijk te houden, waardoor aan het in hoofdstuk I.8 genoemde pakket van eisen voldaan kan worden.

Voor het gebruik van het programma gelden onderstaande algemene punten:

- het door te rekenen netwerk moet worden begrensd door systeemgrenzen met de rand- en beginvoorwaarden op het begintijdstip $t=t_0$;
- de beschouwde reken- of simulatieperiode (van $t=t_0$ tot $t=t_{eind}$) kan willekeurig groot zijn en is afhankelijk van het te onderzoeken probleem.

Omdat de theoretische opzet van het programma gebaseerd is op continue vergelijkingen, is de keuze van de rekenstapgrootte (Δt) flexibel; dit is van groot belang bij het kunnen "inzoomen" op de verschillende hiërarchische niveaus; zo kan de rekenstap van het numerieke oplosproces variëren van één seconde tot één uur, de invoerstap zal hierop afgestemd zijn. De uitvoerstap is een te kiezen veelvoud van de rekenstap.

- In principe is er geen beperking ten aanzien van de grootte van het netwerk, dat wil zeggen van het aantal knopen, buizen en instromen; ook het aantal in- en uitvoergegevens is niet door een grens beperkt;
- een schematisatie van het gedefinieerde systeem moet gemaakt worden voor de geometrie, de instromen en de afnamen op de knooppunten.

Het rekenprogramma biedt de volgende mogelijkheden:

- ruime variaties in de afnamen;
- voor de instromen kunnen pompkarakteristieken, dan wel bekende volumestromen dienen;
- buffering in de vorm van watertorens (windketels) en/of reservoirs;

- het kunnen simuleren van tijdgestuurde afsluiters en pompen binnen de systeemgrenzen;
- het vereenvoudigen van het leidingnet door middel van samenvoegingen van zowel parallelle en/of seriële leidingdelen; hierbij is de hydraulische equivalentie van het oorspronkelijke net gewaarborgd;
- alle voorkomende weerstanden inclusief vertragingverliezen en de invloed van de impulsterm die van belang is op leveringsniveau, kunnen worden meegenomen;
- voor bestaande netwerken is er een praktische identificatiemethode opgenomen voor het corrigeren van de geschatte weerstandswaarden.

Getracht is om in de naamgeving van programma's en files het algemene, respectievelijk specifieke doel weer te geven. Zo is de naamgeving van de (per berekening verschillende) files opgebouwd uit een herkenning van het te berekenen leidingnetwerk ("Naam."), gevolgd door een extensie, bestaande uit enige letters, die het soort gegeven betreffende het te berekenen netwerk aanduiden. De naam kan worden voorafgegaan door het tijdstip van afname of instroom ("****Naam."), de extensie kan worden gevolgd door het knooppunt ("*"). Als voorbeeld: "1400 Naam. R 60": Op instroomtijdstip 14.00 uur, voor netwerk "Naam", de uitvoer reistijden en trajecten van "REISMEE" voor de instroom op knooppunt 60.

III.2 DE OPBOUW VAN HET PROGRAMMA DYNASIM

DYNASIM bestaat uit een aantal deelprogramma's, zie fig. 56, te weten:

- het basis-hoofdprogramma DYNA;
- het facultatieve hoofdprogramma QUALI;
- een aantal (eventueel facultatieve) hulpprogramma's en subroutines, die afhankelijk van de wensen van de gebruiker toegepast kunnen worden. Zo kan onder andere een keuze gemaakt worden uit het berekenen van alleen volumestromen en drukken, of van volumestromen, drukken gecombineerd met reistijden, stromingstrajecten, kwaliteitsveranderingen, enzovoort.

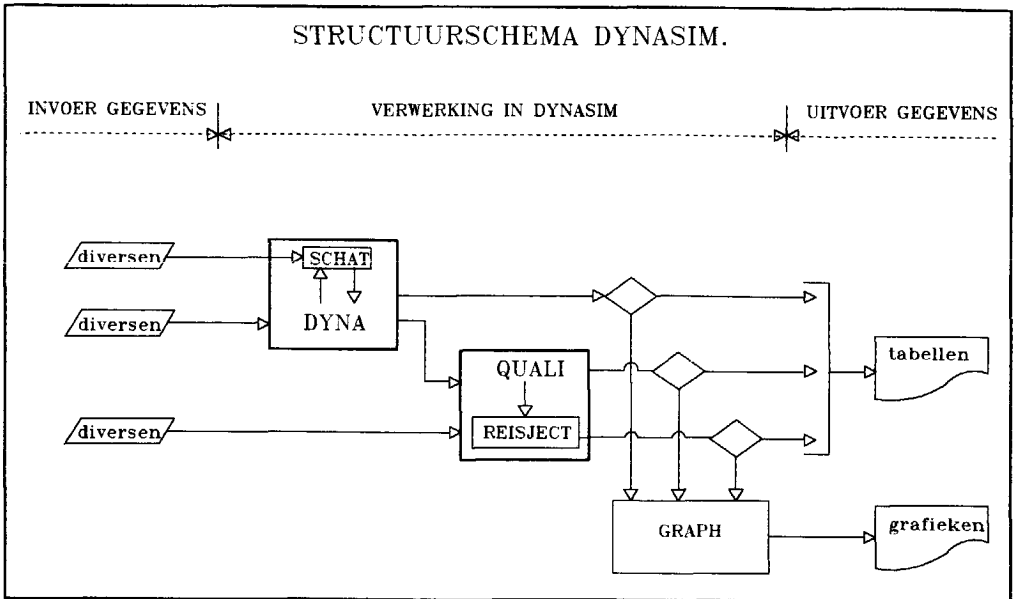


fig. 56 Structuurschema DYNASIM.

III.2.1 Het programma DYNA

DYNA (DYNAmisch) vormt het basis-hoofdprogramma van DYNASIM voor netwerkberekeningen. Het levert drukken, snelheden of volumestromen vanaf het tijdstip $t = t_0$ in vooraf vast te stellen tijdstappen groot Δt tot het einde van de te beschouwen periode $t = t_{\text{eind}}$.

De uitvoer is geschikt voor het uitprinten van de gevraagde gegevens in tabellen, of voor verdere bewerking door de deelprogramma's SCHAT, QUALI en GRAPH.

Hiervoor gebruiken deze deelprogramma's de invoergegevens die in het algemeen of direct worden ingevoerd door middel van het samenstellen van files of voor DYNA eerst nog worden bewerkt door de volgende hulpprogramma's (fig. 57):

- MAZEN: basis-hulpprogramma, detecteert de mazen uit de ingevoerde geometrische structuur, de uitkomsten worden vastgelegd in een file;

- POMP: facultatief hulpprogramma voor het interactief invoeren en werken met pompkarakteristieken die uit discrete waarden worden gegenereerd met splines; de uitkomsten worden vastgelegd in twee files (voordruk en persdruk). In het geval dat de pomp op de systeemgrens staat, wordt de gemeten voordruk ingevoerd; bij een (aanjaag)pomp binnen het netwerk is de voordruk toestandsafhankelijk en volgt uit de berekening.
- WEERSTAND: facultatief hulpprogramma, bepaalt (afhankelijk van de situatie) met White-Colebroke de weerstand van de buizen (afhankelijk van het Reynoldsgetal) uit de ingevoerde k-waarden; hiermee worden bij dimensieverkleining door samenvoeging van parallelle en/of seriële buizen met splinefuncties tevens de vervangende weerstandswaarden bepaald (en de inertanties) van de vereenvoudigde netwerken; deze waarden worden vastgelegd in een file;
- VERBRUIK: facultatief hulpprogramma voor zowel bemeterde als onbemeterde situaties, voor het omrekenen van jaarverbruiken naar momentane verbruiken, voor het bepalen van de tijdsafhankelijke varianten van het afnamepatroon, zowel voor zakelijk als voor huishoudelijk verbruik; in VERBRUIK zijn de verschillende varianten opgenomen voor deze categorieën (zie II.5.4); het programma kan bestanden verwerken van door derden geleverde bewoningsgegevens; de uitkomsten worden vastgelegd in een file.

III.2.2 Het programma QUALI

QUALI (QUALiteit) is het facultatieve hoofdprogramma voor kwaliteitsonderzoek. Het bestaat uit twee hoofddelen: de deelprogramma's REISMEE en REISTEGEN en een facultatief hulpprogramma REISJECT (REIStraJECT). Het programma QUALI wordt gevoed door het inlezen van de uitkomsten van DYNA en de benodigde interactief in te voeren gegevens. De uitkomsten worden vastgelegd in files.

- REISMEE: dit deelprogramma van QUALI bepaalt voor willekeurig te kiezen tijdstippen van vertrek en vanuit alle instroomknopen naar de door die knopen gevoede afnameknopen de reistijden, fractionele stromingen en bijbehorende trajecten; de bepaling is zodanig dat met de stroming mee van de instroomknoop naar de afnameknopen ("met de tijd mee") gerekend wordt; met het facultatieve hulpprogramma REISJECT kan naar behoefte een selectie van de uitvoergegevens gemaakt worden;
- REISTEGEN: dit tweede deelprogramma van QUALI bepaalt voor willekeurig te kiezen afnameknopen en tijdstippen van aankomst dezelfde gegevens evenals de veranderende kwaliteitsparameters over de gevonden trajecten (facultatief); het rekent tegen de stroomrichting in van willekeurig gekozen afnameknopen naar de instroomknopen ("tegen de tijd in"); met het facultatieve hulpprogramma REISJECT kan weer naar behoefte een selectie van de uitvoergegevens gemaakt worden.

III.2.3 Het programma SCHAT

Ten behoeve van de uitvoering van de praktische identificatie is de in de theorie behandelde minimalisatie-routine vertaald in het facultatieve hulpprogramma SCHAT (corrigeren van geSCHATte waarden).

Het dient, indien bij bestaande netwerken gewenst, voor het bijstellen van de weerstanden (en inertanties) naar aanleiding van gemeten stromingen en/of drukken. Het werkt met behulp van de methode van de kleinste kwadraten en levert calibratie-mogelijkheden op de totale weerstanden en dus op de theoretische ingevoerde waarden.

Als gebruik gemaakt wordt van SCHAT, functioneert DYNA als een subroutine voor SCHAT. Het programma SCHAT wordt geactiveerd door het invoeren van de gemeten waarden, waarbij ook een bepaalde gewichtsfactor toegekend kan worden, die de nauwkeurigheid van de meting weergeeft.

III.2.4 Het programma GRAPH

Een grafische visualisering van de vele berekeningsuitkomsten verdient, vooral bij dynamische berekeningen, veelal de voorkeur boven een alfa-numerieke uitvoer in tabelvorm.

Het hulpprogramma GRAPH (GRAPHische verwerking) werkt met de uitvoeren van DYNA en QUALI.

Een groot voordeel van visualisatie is tevens dat hierdoor de toegankelijkheid van de informatie vergroot wordt.

Verder is het van belang om, vooral bij nieuwe leidingnetwerken, bij alternatieve oplossingen de effectiviteit te kunnen beoordelen die de verschillende wijzen van instromen of variaties van de net-configuratie hebben op de reistijden, de gevolgde trajecten en de fractieverdelingen. Voor deze beoordeling zijn vooral cumulatieve frequentieverdelingen (CFV) behulpzaam, omdat met dergelijke krommen een aantal beoordelingsaspecten op hun waarden te vergelijken zijn (bijvoorbeeld de 50%- en/of de 95%-waarden en de mate van steilheid van de kromme). Deze laten met betrekking tot de netdoorstroming op een vrij eenvoudige en snelle wijze een kwaliteitsbeoordeling toe.

Behalve een CFV kan het ook nuttig zijn om de afgeleide waarden van deze kromme te kennen als maat voor de grootte van de momentane uitstroom uit het net. Hiermee is bijvoorbeeld te bepalen op welk tijdstip de netbelasting het grootst is. Zo kan met behulp van lineaire regressie techniek (LR) voor een gekozen tijdstip de afgeleide van de CFV bepaald worden. Daar het hier gaat om een bepaling van ordegrrootte is deze techniek voldoende nauwkeurig.

Ook GRAPH is modulair opgebouwd, met als kern een bestaand grafisch pakket (in Fortran). Hieraan zijn in het deelprogramma RBEWERK de bepalingen van de CFV en de afgeleide waarde hiervan toegevoegd. Hiermede kan de gebruiker zelf de gewenste uitvoer en vorm bepalen.

In deze paragraaf zullen, op een met stroomdiagrammen vergelijkbare wijze, binnen de hoofd- en hulpprogramma's de relaties en gegevensstromen beschreven worden tussen de opeenvolgende stappen, met vermelding van de belangrijkste subroutines.

III.3.1 De relaties binnen DYNA

Fig. 57 toont een zeer schematisch beeld van de gegevensstromen en van de relaties tussen de hulpprogramma's en subroutines binnen het basis-hoofdprogramma DYNA.

Achtereenvolgens zullen de subroutines toegelicht worden. Voor de reeds beschreven hulpprogramma's, zie III.2.1.

Toelichting:

- INVOER: subroutine voor de invoer en bewerking van alle gegevens voor DYNA;
- INSTROOM: subroutine, bepaalt de instroom voor tijdstip t , het gebruikt de gegevens van POMP of instroom hoeveelheden ten behoeve van JACOB en RES;
- WREKEN: subroutine, bepaalt de weerstand voor de verschillende volumestromen (met WEERSTAND) of werkt met discreet ingevoerde gegevens; de uitkomsten kunnen gecorrigeerd worden met behulp van de in SCHAT bepaalde correctiefactoren en worden gebruikt in JACOB en RES;
- AFNAME: subroutine voor JACOB en RES, berekent de afnamegegevens uit VERBRUIK of uit de per knoop ingevoerde afnamen; de discrete afnamefuncties worden continu gemaakt met splines of door lineaire functies met elkaar te verbinden, waarbij tevens voor het leveringsniveau het in de theorie besproken ruissignaal opgeteld kan worden (de bepalingwijze van de (on)bemeterde afnamen is genoemd in lit.25, hoofdstuk I, onder de verbruiken);

- **INITIEREN:** subroutine voor het initiëren van de beginvoorwaarden \bar{X}_0 en \bar{X}_0' voor de begintijd $t_0 = 0$, roept achtereenvolgens 10x LSODI aan; bepaalt de drukboom voor de afleiding van het tracé tussen de beschouwde knoop en de buffer;

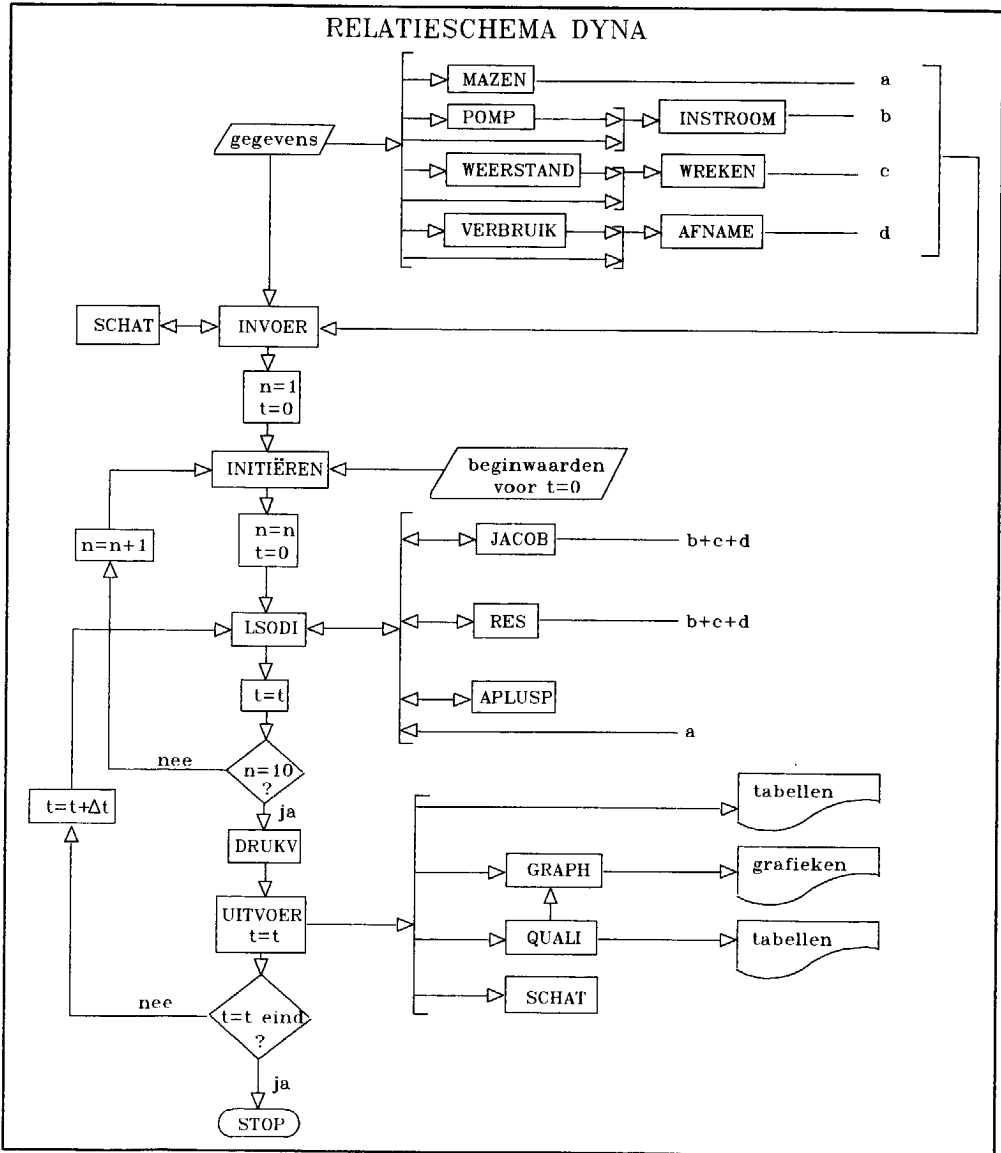


fig. 57 Relatieschema DYNA.

- LSODI: in deze fase een subroutine voor INITIËREN en voor de berekening van de stromingen voor het tijdstip $t=t$ over de periode t_0 tot t_{eind} , hierbij wordt gebruik gemaakt van APLUSP en van de uitkomsten van MAZEN, JACOB en RES; de numerieke oplossing vindt plaats via de differentiaalvergelijking I:

$$\dot{\bar{A}\bar{X}} = G\bar{X} + H\bar{X}^2 + \bar{B} + \bar{C}$$

Het numerieke proces van de correctorbepaling wordt afgebroken door de grootte van de restvector te gebruiken als afbreekcriterium; dit kan zowel absoluut als relatief interactief opgegeven worden in LSODI, waarna vervolgens de predictorwaarde wordt geschat (zie II.5); de uitvoerresultaten worden door UITVOER verwerkt en verzameld in files, geschikt voor weergave in tabellen, of voor verwerking door QUALI en/of GRAPH;

- RES: subroutine voor LSODI, bepaalt de RESiduvector \bar{R} volgens:

$$\bar{R} = G\bar{X} + H\bar{X}^2 + \bar{B} + \bar{C} - \dot{\bar{A}\bar{X}}$$

waarin \bar{R} de waarde nul benadert; gebruikt dezelfde gegevens als JACOB;

- JACOB: subroutine voor LSODI, voor de bepaling van de JACOBiaanfunctie van de residuvector volgens:

$$\frac{d\bar{R}}{d\bar{X}} = G + \frac{dH\bar{X}^2}{d\bar{X}} + \frac{d\bar{B}}{d\bar{X}} + \frac{d\bar{C}}{d\bar{X}}$$

Deze is afhankelijk van de instroomsituaties (bekende instromen of pompkarakteristieken); het gebruikt de uitkomsten van AFNAME, INSTROOM en WREKEN;

- APLUSP: subroutine voor LSODI, telt de A-matrix op bij de JACOBiaanfunctie;
- DRUKV: subroutine voor de berekening van de drukken uit de berekende stromingen (DRUKVerlies) voor het tijd-

stip $t=t$ over de periode t_0 tot t_{eind} ; het gebuikt de uitkomsten van LSODI voor de toestandsvector \bar{X} ; de berekening vindt plaats in vergelijking II:

$$\bar{P} = D\bar{X}^2 + E\bar{X} + \bar{F}$$

De berekeningsresultaten worden door UITVOER verwerkt;

$t=t+\Delta t$: subroutine voor de ophoging van de tijd met een vooraf ingestelde stapgrootte;

$t=t_{eind}$: subroutine, controleert het aantal stappen waarin de drukken en volumestromen berekend moeten worden totdat het eindtijdstip $t=t_{eind}$ is bereikt; in de lus worden, zolang nog niet wordt voldaan aan de voorwaarde $t=t_{eind}$, de bij deze tijdstappen behorende uitvoergegevens uitgerekend met tijdstappen Δt ;

UITVOER: subroutine die alle resultaten van DYNA bewerkt voor weergave in tabellen en/of verdere verwerking door SCHAT, QUALI of GRAPH.

III.3.2 De relaties binnen QUALI

De relaties binnen het facultatieve hoofdprogramma QUALI worden afzonderlijk besproken voor de delen REISMEE en REISTEGEN.

In de figuren 58 en 59 worden achtereenvolgens de opeenvolgende bewerkingen in de deelprogramma's REISMEE en REISTEGEN getoond.

De invoergegevens voor QUALI bestaan uit:

- in DYNA ingevoerde (netwerk)gegevens;
- in DYNA berekende volumestromen en drukken;
- overige interactief of via een file in te voeren gegevens.

Alle gegevens worden door de subroutine INVOER bewerkt.

Het deelprogramma REISMEE

Interactief worden de instroomtijdstippen en het afbreekcriterium opgegeven (fig. 58). Het afbreekcriterium dient zodanig gekozen te worden, dat de rekentijden beperkt blijven, zonder te veel aan informatie te verliezen aangaande stromingsfracties binnen het leidingnet.

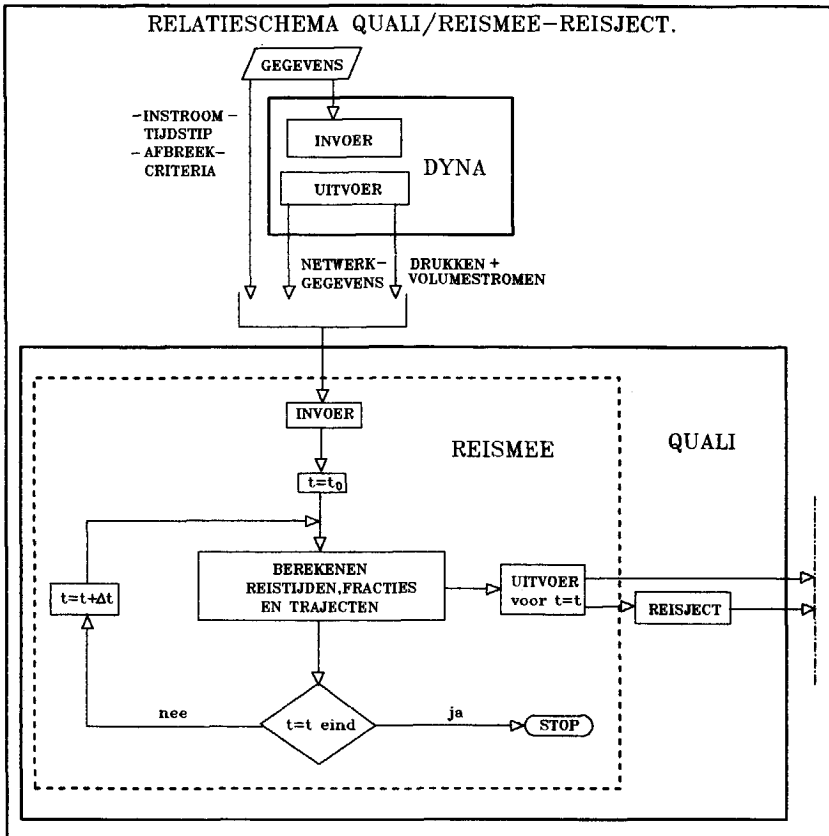


fig. 58 Relatieschema QUALI/REISMEE-REISJECT.

Er kan een keuze gemaakt worden uit één of meer instroomtijdstippen of een gehele tijdsperiode (van $t=t_0$ tot $t=t_{eind}$) die doorgerekend dient te worden in de tijdstappen Δt .

Is gekozen voor verscheidene instroomtijdstippen of een gehele tijdsperiode, dan wordt de getekende lus net zo lang doorlopen totdat alle opgegeven instroomtijdstippen of de gehele tijdsperiode doorgerekend zijn. Het programma eindigt daarna en voert de berekende waarden voor reistijden, trajecten en fracties uit (eventueel naar REISJECT of naar GRAPH).

Het hulpprogramma REISJECT

REISJECT werkt interactief, zowel voor REISMEE, als voor REISTEGEN. Het wegschrijven van de trajecten in de reistijdbepaling gebeurt met een zekere code. Om de trajecten leesbaar op een file te krijgen, moet gebruik gemaakt worden van REISJECT. Met dit programma kunnen eventueel de door de gebruiker gewenste trajecten geselecteerd en weggeschreven worden. De gebruiker kan aan de hand van de tabel bepalen welke trajecten hij van belang vindt. Als voorbeeld zie tabel 5 (in III.4.2), waarin de trajecten van instroomknoop naar afnameknoop via de doorlopen buizen in het traject zijn aangegeven.

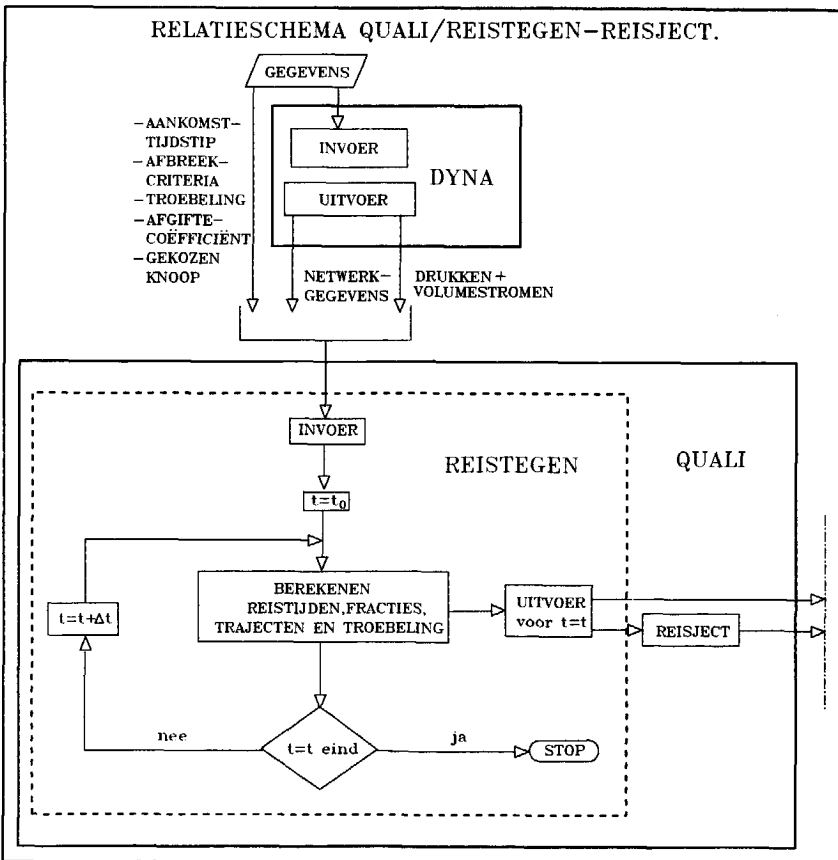


fig. 59 Relatieschema QUALI/REISTEGEN-REISJECT.

Het deelprogramma REISTEGEN

Binnen het deelprogramma REISTEGEN verlopen de opeenvolgende stappen op een overeenkomstige wijze als bij REISMEE, behoudens de volgende verschilpunten:

- invoer van het gewenste aankomsttijdstip op een afnameknoop in plaats van het instroomtijdstip;
- invoer van begin-waterkwaliteitsgegevens en afgifte-coëfficiënten van de doorstroomde buizen, zoals van Fe bij troebelheidsberekeningen;
- extra berekening van de waterkwaliteitsparameters, uitgaande van de verschillende leidingen en eventuele verschillende watersoorten.

Een en ander is weergegeven in fig. 59.

III.3.3 De relaties binnen SCHAT

Indien voor bestaande leidingnetwerken naar aanleiding van de grootte van de verschillen tussen de gemeten en berekende drukken/of snelheidswaarden de weerstandswaarden bijgesteld moeten worden, wordt het facultatieve hulpprogramma SCHAT (fig. 60) doorlopen ter bepaling van de correctiefactoren, waarmee DYNA in WEERSTAND de waarden aanpast; deze worden vastgelegd in twee files (Naam.Dyn en Naam.Cor).

Bij het bepalen van de correctiefactoren wordt ook enige malen DYNA doorlopen, totdat het opgegeven criterium bereikt is.

In maximaal 3 iteratiestappen worden de correctiewaarden bepaald. Het is namelijk gebleken dat in deze 3 stappen de grootste correcties plaatsvinden.

Met de uiteindelijk gevonden factoren (in Naam.Dyn) bepaalt DYNA de meest nauwkeurige waarden voor weerstanden en daarmee voor de stromingen en drukken.

Indien het uiteindelijke resultaat nog te veel afwijkt van de gemeten waarden, of indien de som van de kleinste kwadraten te groot is, dan worden de correctiefactoren via Naam.Car als Naam.Cor opnieuw ingevoerd in INVOER, waarna nieuwe correctiefactoren bepaald worden.

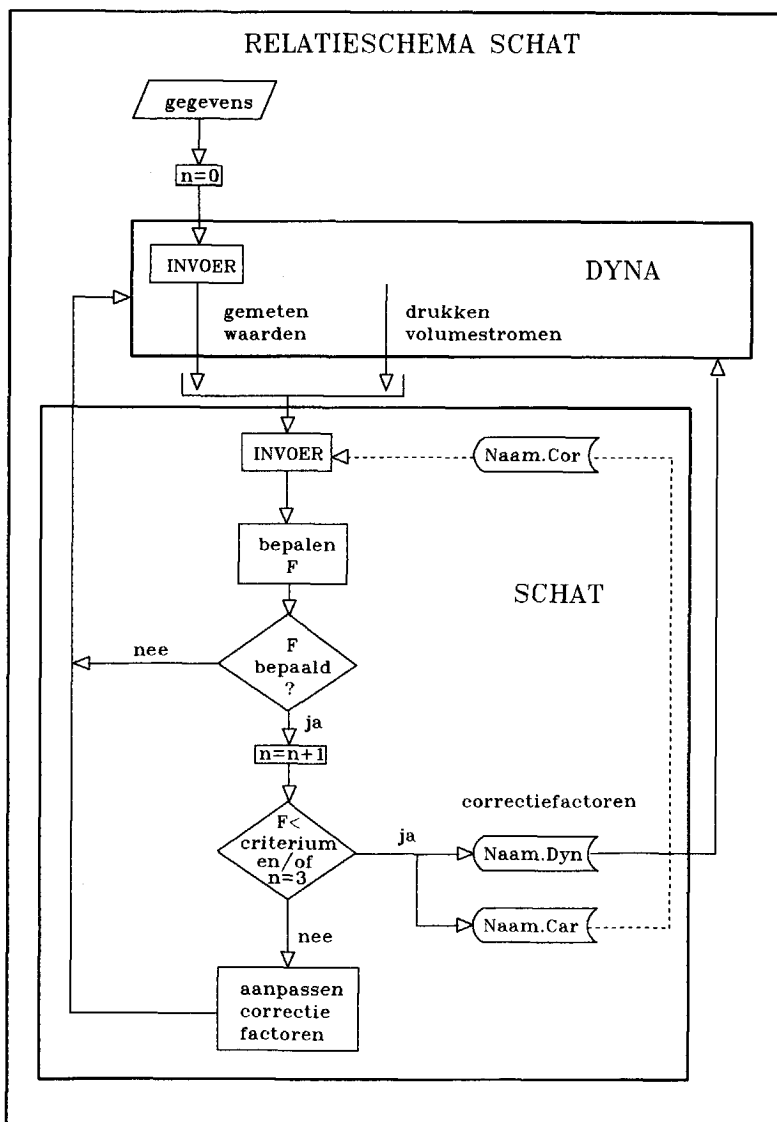


fig. 60 Relatieschema SCHAT.

III.3.4 De relaties binnen GRAPH

Fig. 61 toont zeer schematisch de opzet van het facultatieve hulpprogramma GRAPH. Dit programma wordt alleen gebruikt als een grafische presentatie van de gegevens gewenst is.

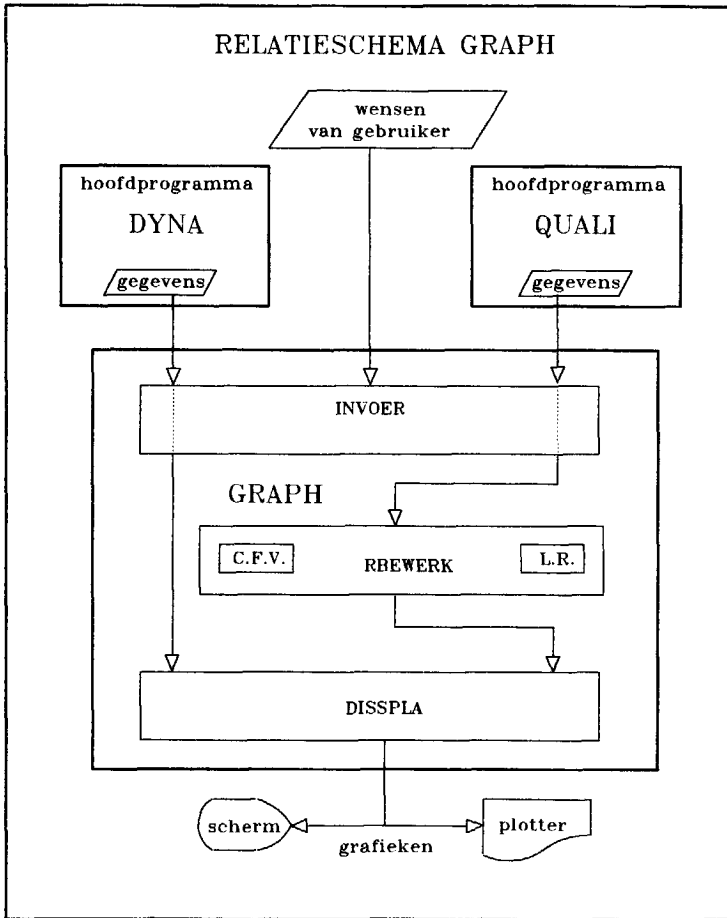


fig. 61 Relatieschema GRAPH.

Toelichting:

- INVOER: subroutine die de berekende gegevens van DYNA en QUALI en de uitvoerwensen van de gebruiker omzet in begrijpelijke invoer voor RBEWERK en voor het te gebruiken grafische pakket;
- RBEWERK: hulpprogramma met als subroutines CFV en LR;
- CFV: subroutine voor de bepaling van de Cumulatieve Frequentie Verdeling van de berekeningsresultaten met QUALI;
- LR: subroutine voor de bepaling van de afgeleide van de CFV met Lineaire Regressie van de berekeningsresultaten met QUALI;
- DISSPLA: subroutine; het is een bestaand grafisch pakket, bestaande uit meerdere subroutines, die door aanvullende programmering tot één hulpprogramma voor GRAPH verenigd zijn.

III.4 IN- EN UITVOERSTRUCTUUR VAN DE DEELPROGRAMMA'S

Een belangrijk aspect van de in- en uitvoerstructuren van de gegevensstromen is de wijze waarop de gegevens worden ingelezen, opgeslagen en verwerkt.

De meeste in- en uitvoergegevens worden bewerkt en verzameld in files, geschikt voor verwerking, of voor uitvoer op het scherm of naar een printer (tabellen). Andere gegevens worden interactief ingevoerd in het desbetreffende programma, of in een hulpprogramma aangemaakt ten behoeve van het volgende programmadeel.

Onderstaand worden de verschillende gegevensstromen voor de voornaamste programma's toegelicht. De met een filenaam aangeduide gegevens worden onder deze naam opgeslagen.

III.4.1 In- en uitvoerstructuur van DYNA

In DYNA, het basis hoofdprogramma van DYNASIM, vinden de belangrijkste bewerkingen plaats. Uitleg vindt plaats aan de hand van fig. 62.

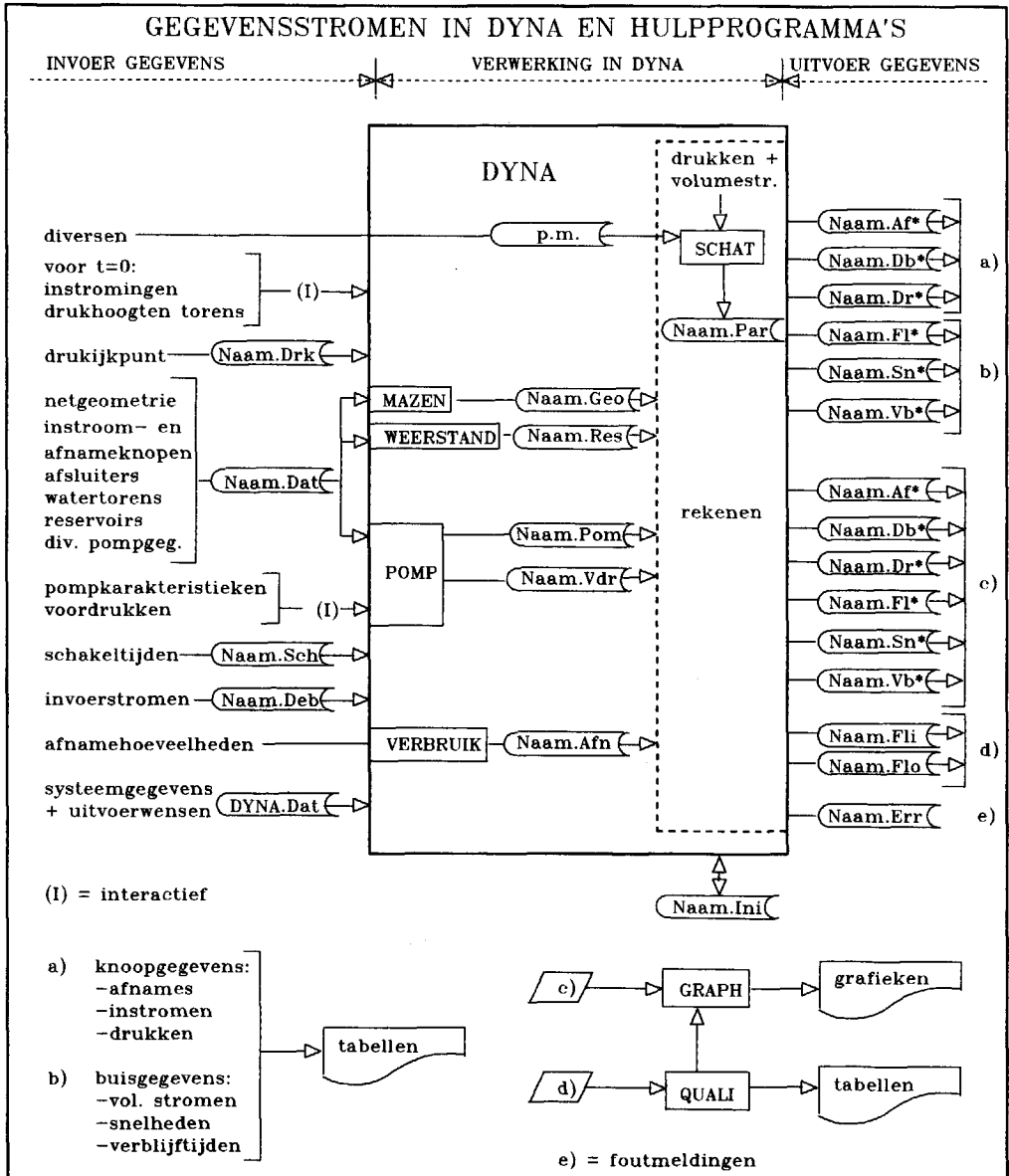


fig. 62 Gegevensstromen in DYNA en de hulpprogramma's.

In de subroutine INVOER (fig. 57) worden de meeste externe gegevens ingevoerd en bewerkt voor verdere verwerking. In fig. 62 is de gegevensstroom schematisch weergegeven voor DYNA en voor de hulpprogramma's MAZEN, WEERSTAND en POMP. Tevens is te zien dat SCHAT voor een deel ook gebruik maakt van dezelfde invoergegevens als DYNA.

De uitvoer van DYNA is direct geschikt voor het printen van tabellen, of voor verdere verwerking in SCHAT, QUALI of GRAPH.

De invoer

Nadere beschrijving van de in het bestand opgenomen en in fig. 62 weergegeven files:

- **vaste bestanden** die aangemaakt moeten worden:

Naam.Dat: informatie aangaande de geometrie (knooppunt nummers met aangesloten buisnummers), buisgegevens (lengten en middellijnen), k-waarden voor de wandruwheid, ζ -waarden, aantallen pompen, buffers, enzovoort;

Naam.Geo: maasindeling door middel van maasnummers met bijbehorende buisnummers; wordt gegenereerd door MAZEN met als invoer de gegevens uit Naam.Dat.;

Naam.Afn: bevat de tijdsafhankelijke afnameverdeling over de knopen van het netwerk; wordt aangemaakt door VERBRUIK;

Naam.Res: vervangende weerstanden, worden gegenereerd door WEERSTAND, met als invoer de gegevens uit Naam.Dat.;

DYNA.Dat: benodigde vaste parameters voor het rekenproces en parameters die aangeven welke files uitgevoerd moeten worden.

- **facultatieve bestanden**, afhankelijk van de toepassing moet een keuze gemaakt worden uit:

Naam.Dyn: deze file wordt door SCHAT aangemaakt indien de weerstanden gecorrigeerd moeten worden door gemeten waarden; hij bevat de eindwaarden van de correctiefactoren;

Naam.Vdr: voordrukken van de pompen, die in de regel afkomstig zijn van reservoirstanden; wordt aangemaakt door POMP;

Naam.Pom: de splinecoëfficiënten van de gegeven pompkrommen, gegenereerd door POMP met als invoeren onder andere de gegevens uit Naam.Dat;

Naam.Deb: gemeten waarden voor de instroomhoeveelheden;

Naam.Sch: schakeltijden van pompen en afsluiters in het net; hier kunnen ook waarden voor extra vertragingsverliezen opgenomen worden;

Naam.Drk: drukmeetpunt ten behoeve van het invoeren van een gemeten of bekend verondersteld drukverloop bij een netwerk zonder buffer; zijn er wel buffers, dan moet een beginvoorwaarde op tijdstip $t = t_0$ voor de bufferdruk, de hoogte van het waterniveau in het reservoir of in de toren, ingevoerd worden.

- hulpbestand van DYNA:

Naam.Ini: bevat de geïnitieerde en berekende eindwaarden van de toestandsvector \bar{X} over een gekozen periode, deze dienen als beginvoorwaarde voor een volgende simulatie-interval.

De uitvoer

De uitvoer van DYNA is, na bewerking door de subroutine UITVOER (fig. 57), geschikt voor weergave in tabellen; indien weergave in grafieken gewenst is, moet deze uitvoer nog bewerkt worden door het hulpprogramma GRAHP. De uitvoer wordt verzameld in de volgende bestanden:

- knoopgegevens:

Naam.Af*: de volumestromen van de afname in de afnameknopen;

Naam.Db*: de volumestromen van de invoer in de instroomknopen;

Naam.Dr*: de drukken in alle knopen;

- buisgegevens:

Naam.Fl*: de volumestromen;
 Naam.Sn*: de stroomsnelheden;
 Naam.Vb*: de verblijftijden in de afzonderlijke buizen;

Indien verdere kwaliteitsberekeningen gemaakt moeten worden, levert UITVOER van DYNA hiervoor ten behoeve van QUALI de invoerfiles:

Naam.Fli: de volumestromen van de invoeren en de drukken in de buffers;
 Naam.Flo: de volumestromen door de buizen.
 Naam.Err: een fouten-file waarin eventuele fouten worden verzameld.

Als voorbeeld van een alfa-numerieke uitvoer van DYNA zijn in onderstaande tabellen 2 en 3 de resultaten weergegeven van respectievelijk de drukkerekeningen in de knopen (Naam.Dr*) en van de volumestromen respectievelijk snelheden in de buizen (Naam.Fl*).

| Uitvoer van drukken op knooppunten in mwk van netwerk Naam	|
| Datum van de run : 1-JAN-89	|
| Tijd van de run : 00:00:00	|
| Commentaar :	|

| tyd in uur	| punt 51	| punt 52	| punt 53	| punt 54	| punt 55	| punt 56	| punt 57	| punt 58	| punt 59
11.00	25.14	25.12	25.13	25.13	25.14	25.15	25.14	25.13	25.12
12.00	25.06	25.05	25.06	25.06	25.07	25.09	25.08	25.05	25.04
13.00	25.08	25.07	25.08	25.08	25.07	24.68	24.68	25.08	25.08
14.00	25.01	25.00	25.01	25.00	25.01	25.06	25.05	24.99	24.97
15.00	25.03	25.02	25.03	25.03	25.03	25.04	25.03	25.02	25.02

tabel 2 Uitvoer DYNA, drukken in de knopen.

| Uitvoer van flows in buizen in m3/h van netwerk Naam |					
| Datum van de run : 1-JAN-89 |					
| Tijd van de run : 00:00:00 |					
| Commentaar : |					
| tyd in uur | buis 51 | buis 52 | buis 53 | buis 54 | bui					
11.00	30.93	2.91	3.93	-7.91	29
12.00	29.12	3.01	3.97	-7.44	27
13.00	27.28	2.32	3.42	-6.98	25
14.00	24.58	1.84	2.65	-6.27	23
15.00	22.20	1.90	2.63	-5.70	20

| Uitvoer van snelheden in buizen in m/s van netwerk Naam |					
| Datum van de run : 1-JAN-89 |					
| Tijd van de run : 00:00:00 |					
| Commentaar : |					
| tyd in uur | buis 51 | buis 52 | buis 53 | buis 54 | bui					
11.00	0.1750	0.0658	0.0889	-0.0699	0.
12.00	0.1648	0.0682	0.0900	-0.0658	0.
13.00	0.1544	0.0584	0.0780	-0.0617	0.
14.00	0.1391	0.0417	0.0601	-0.0555	0.
15.00	0.1256	0.0431	0.0596	-0.0504	0.

tabel 3 Uitvoer DYNA volumestromen-snelheden in buizen.

III.4.2 In- en uitvoerstructuur van QUALI

In fig. 63 zijn de gegevensstromen voor QUALI in beeld gebracht. Het facultatieve hoofdprogramma QUALI bestaande uit de deelprogramma's REISMEE en REISTEGEN, waarvan de invoeren voor deze deelprogramma's zijn:

- de gebruikte invoer-file Naam.Dat van DYNA;
- de voor QUALI bewerkte uitvoerfiles van DYNA in Naam.Fli en Naam.Flo;
- kwaliteitsgegevens (alleen voor REISTEGEN) in Naam.Tro;
- interactief enige aanvullende gegevens.

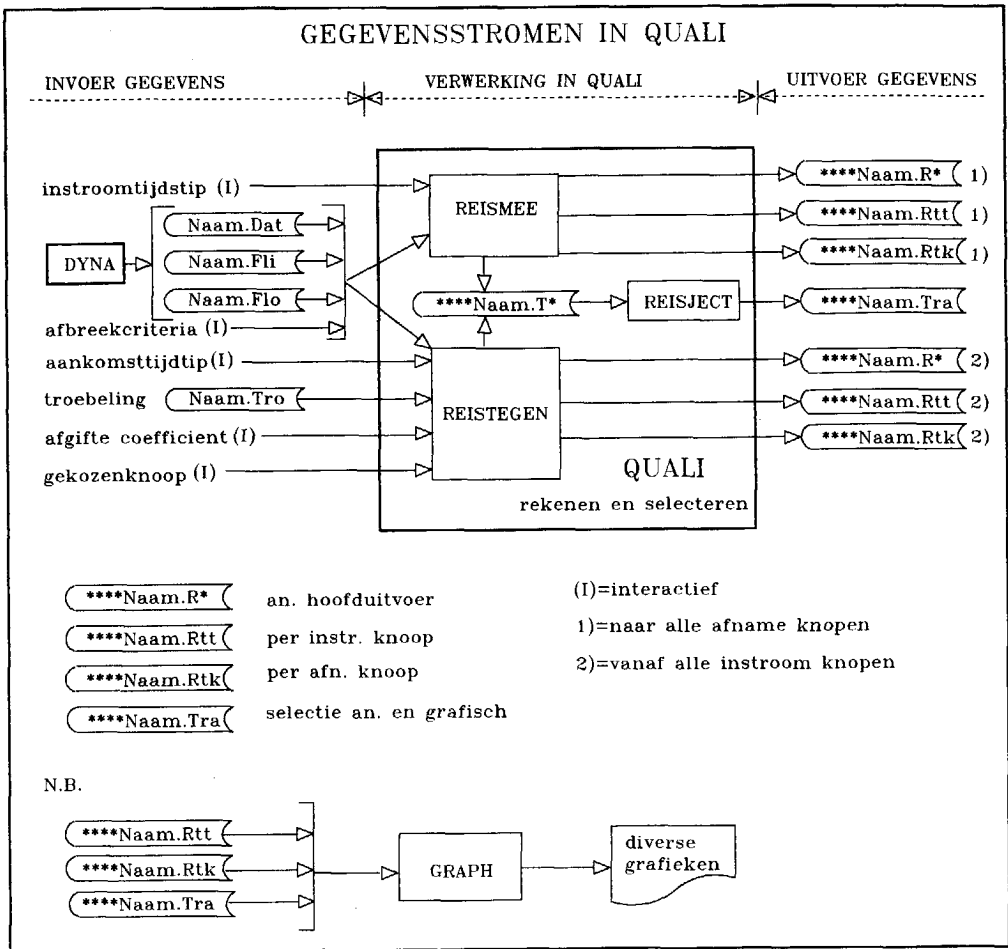


fig. 63 Gegevensstromen QUALI.

De invoer

Nadere beschrijvingen van de in het bestand opgenomen en in fig. 63 weergegeven invoerfiles:

Naam.Dat: informatie aangaande de geometrie van het leidingnet (zie DYNA);

Naam.Fli: de berekende instromen en bufferdrukken;

Naam.Flo: de berekende stromingen door de buizen;

Naam.Tro: alleen voor REISTEGEN; het bevat de begin-troebe-
 lingen van het water in de instroomknoop en de
 afgifte-coëfficiënten voor de verschillende lei-
 ding-materiaalsoorten, zoals voor Fe. Een en ander
 is afhankelijk van de watersoorten en van de
 dimensies van de leidingen.

De uitvoer

De uitvoeren zijn óf direct geschikt voor tabellen, óf voor ver-
 dere verwerking in REISJECT ten behoeve van grafische uitvoer.

Tabel 4 geeft een overzicht van de uitvoer van REISMEE.

Het toont de reistijden, de trajectnummers en de fracties van het
 water dat het net is ingestroomd in knoop 1 op tijdstip 0.00 uur,
 naar de verschillende afnameknopen.

Naam van het netwerk: Naam								
De reistijden van het water uit instroomknoop 1 met instroomtijdstip 0.00 uur (afbreecriterium: 0.0100000 %)								
knoop	gemiddelde reistijd [uur]	totale fractie [%]	aantal trajecten (met wato)	reistijd [uur] (trajectnr.)		fractie [%] (trajectnr.)		
				kortste	langste	kleinste	grootste	
37	11.03	0.30835	1 (0)	11.03 (1)	11.03 (1)	0.30835 (1)	0.30835 (1)	
38	10.58	0.02275	1 (0)	10.58 (1)	10.58 (1)	0.02275 (1)	0.02275 (1)	
39	10.53	0.00763	1 (0)	10.53 (1)	10.53 (1)	0.00763 (1)	0.00763 (1)	
48	10.11	0.02912	1 (0)	10.11 (1)	10.11 (1)	0.02912 (1)	0.02912 (1)	
49	10.29	0.03946	1 (0)	10.29 (1)	10.29 (1)	0.03946 (1)	0.03946 (1)	
50	10.56	0.01128	1 (0)	10.56 (1)	10.56 (1)	0.01128 (1)	0.01128 (1)	
52	11.16	0.06732	1 (0)	11.16 (1)	11.16 (1)	0.06732 (1)	0.06732 (1)	
53	11.11	0.01297	1 (0)	11.11 (1)	11.11 (1)	0.01297 (1)	0.01297 (1)	
55	7.03	6.59132	3 (0)	6.35 (2)	9.47 (1)	0.28206 (1)	4.59079 (2)	
56	3.20	5.91766	2 (0)	2.60 (2)	9.10 (1)	0.31997 (1)	5.59769 (2)	
57	4.21	4.37903	2 (0)	4.05 (2)	9.17 (1)	0.22161 (1)	4.15742 (2)	
58	7.13	1.06541	4 (0)	6.42 (4)	12.17 (1)	0.01457 (2)	0.93010 (4)	
60	10.03	0.78929	4 (0)	9.52 (4)	13.13 (1)	0.01852 (1)	0.68769 (4)	
61	6.14	1.33792	1 (0)	6.14 (1)	6.14 (1)	1.33792 (1)	1.33792 (1)	

percentage instroming van totale instroming : 13.20 %
percentage van instroming dat afgenomen wordt : 100.00 %
gemiddelde reistijd water uit instroomknoop : 5.33 uur

tabel 4 Uitvoer REISMEE; voor instroomknoop 1 en instroomtijd-
 stip 0.00 uur de reistijden, trajectnummers en fracties.

De uitvoer van REISMEE bestaat uit de volgende vijf files:

****Naam.R*: de hoofduitvoer van de reistijden in tabelvorm (tabel 4); het is een overzicht van de karakteristieke uitkomsten per instroomknoop naar alle afnameknopen en wordt voor elke instroomknoop aangemaakt; de tabel bevat de volgende informatie; (de kolommen worden achtereenvolgens besproken):

.knoop:

het nummer van de afnameknoop waar het water vanuit de beschouwde instroomknoop is aangekomen; (hier zijn dit de knopen 37, 38 39 en 61);

.gemiddelde reistijd:

de gemiddelde (fictieve) reistijd van de totale, door de instroomknoop te 0.00 uur geleverde, hoeveelheid in de afnameknoop aangekomen water; deze kolom geeft dit voor alle getraceerde trajecten;

.totale fractie:

de hoeveelheid water die in de afnameknoop aankomt na de gemiddelde reistijd, uitgedrukt als fractie van de beschouwde instroom op 0.00 uur;

.aantal trajecten:

het aantal trajecten van de instroomknoop naar deze afnameknoop; tussen haken is aangegeven of een traject een buffer bevat;

.kortste en langste reistijd:

van alle trajecten naar deze knoop wordt bepaald welke de langste en de kortste reistijd heeft, het cijfer tussen haken geeft het bijbehorende trajectnummer aan;

.kleinste en grootste fractie:

van alle trajecten naar deze knoop wordt bepaald welk traject de grootste en de kleinste hoeveelheid water heeft aangevoerd;

Als voorbeeld: de gemiddelde reistijd van het water van instroomknoop 1 naar afnameknoop 55, bedraagt 7.03 uur. De aangekomen fractie is 6,59% van de ingestroomde hoeveelheid op knoop 1 te 0.00 uur. Er zijn drie trajecten, met nummers 1, 2 en 3. De kortste reistijd is 6.32 uur over trajectnummer 2 en de langste 9.47 uur over traject 1. De aankomstfracties bedragen 0,28% over trajectnummer 1 en 4,59% over trajectnummer 2.

Verder wordt in de uitvoer (onderaan) tabel 4, ook het percentage van de totale instroom vermeld dat geleverd wordt door de instroomknoop, het getraceerde percentage dat wordt afgenomen en de gemiddelde reistijd van deze instroom naar alle afnamepunten. Het getraceerde percentage van de beschouwde instroom houdt rekening met het opgegeven afbreekcriterium (hier 0,01%).

De overige vier files zijn:

- ****Naam.Rtt: vastlegging per instroomknoop van alle trajecten met reistijden en fracties; ten behoeve van het maken van een CFV door het deelprogramma GRAPH; (Rtt = Reistijden trajecten);
- ****Naam.Rtk: de, per afnameknoop bepaalde, gemiddeld reistijden van het totaal aangekomen fracties op een afnameknoop, zoals die ook in ****Naam.R* zijn opgenomen ten behoeve van het maken van een CFV door het deelprogramma GRAPH; (Rtk = Reistijden knopen);
- ****Naam.T..: registratie per instroom-knoop van alle trajecten naar de afnameknopen, met buis- en knoopnummers; ten behoeve van het hulpprogramma REISJECT waarmee de gewenste trajecten kunnen worden opgezocht; voor elke instroomknoop wordt deze file aangemaakt; ("T.." = Trajecten);
- ****Naam.Tra: ten behoeve van zowel een uitvoer in tabelvorm zie tabel 5, alswel (via GRAPH) grafisch ("Tra"= de gekozen Trajecten).

trajecten van het netwerk											Naam									
instroomtijdstip: 0.00 uur											(REISMEE)									
in- knoop	aan- knoop	tra- nummer	reistijd [uur]	fractie [%]	leidingen en watertorens in het traject															
					.: leiding	w. : watertoren														
1	13	1	0.55	1.2288	1	15	14	13												
1	14	1	0.44	1.2263	1	15	14													
1	24	1	5.14	0.2892	1	2	3	5	6	7	16									
1	24	2	2.26	1.6106	1	15	14	13	12	9	8	16								
1	25	1	6.07	1.8628	1	2	3	5	6	7	16	17								
1	25	2	4.06	10.5306	1	15	14	13	12	9	8	16	17							
40	3	1	2.29	0.2007	51	39	36	34	33	2										
40	5	1	5.33	0.5479	51	39	36	34	33	2	3	4								
40	6	1	3.37	0.1921	51	39	36	34	33	2	3	5								
40	7	1	5.24	0.5906	51	39	36	34	33	2	3	5	6							
86	82	1	5.16	3.2161	89	82	83	69	67											
86	82	2	7.35	0.5205	89	82	83	69	67	66	65	66								
86	82	3	9.27	0.1781	89	82	83	69	67	66	65	66	67	69	83	69	67			
86	84	1	8.04	0.6696	89	82	83	69	67	66	65	66	67	68						
86	84	2	9.42	0.2738	89	82	83	69	67	66	65	66	67	69	83	69	68			
86	84	3	5.54	4.8493	89	82	83	69	68											

tabel 5 Uitvoer REISMEE, trajecten voor instroomtijdstip 0.00 uur.

De tabel bevat de volgende gegevens: de instroomknoopnummers, de afnameknoopnummers, het trajectnummer volgens welk traject de stroming van instroom- naar afnameknoop is verlopen, de reistijd, de fractie van het aangekomen water en de buisnummers die in het traject voorkomen.

Als voorbeeld: van instroomknoop 1 gaat één traject naar afnameknoop 13 met een gemiddelde reistijd van 0.55 uur, de aankomstfractie is 1,23% van de ingestroomde hoeveelheid op 0.00 uur.

De doorlopen buizen zijn: 1, 15, 14 en 13.

De uitvoer van REISTEGEN bestaat uit vier files en komt overeen met die van REISMEE, met de volgende verschillen (tabel 6 geeft de hoofduitvoer):

De reistijden van het water naar knoop 8 met aankomsttijdstip 0.00 uur (afbreekcriterium : 0.01000000 %)									
in- stroom knoop	gemiddelde reistijd [uur]	totale fractie [%]	aantal trajecten	reistijd {uur} (trajectnr.)		fractie [%] (trajectnr.)			
				kortste	langste	kleinste	grootste		
1	2.36	61.28072	2	2.14 (2)	4.39 (1)	9.28570 (1)	51.99503 (2)		
40	4.34	22.21452	3	4.21 (2)	5.53 (1)	2.28637 (1)	13.09646 (2)		
47	6.08	16.50476	3	5.58 (2)	7.06 (1)	1.73236 (1)	9.69714 (2)		

tabel 6 Uitvoer REISTEGEN reistijden, trajectnummers, fracties voor het water naar knoop 8 aankomsttijdstip 0.00 uur.

- ****Naam.R*: hoofduitvoer van REISTEGEN in tabelvorm; overzicht van de karakteristieke uitkomsten per afnameknoop vanaf alle instroomknopen; de tabel bevat de volgende informatie:

.knoop:

het nummer van de instroomknoop waar het water vandaan gekomen is;

.gemiddelde reistijd:

de gemiddelde (fictieve) reistijd van de hoeveelheid water die vanuit de instroomknoop vertrokken is naar de afnameknoop en die aangekomen is op aankomsttijdstip 0.00 uur;

.totale fractie:

de hoeveelheid water van de instroomknoop die op de afnameknoop is aangekomen, uitgedrukt in een fractie van de afname in de beschouwde afnameknoop;

.aantal trajecten:

het aantal trajecten van deze instroomknoop naar de afnameknoop;

.kortste en langste reistijd:

van alle trajecten vanuit de instroomknoop naar de aankomstknoop de langste en kortste in tijd;

.kleinste en grootste fractie:

van alle trajecten vanuit de instroomknoop naar de aankomstknoop de grootste en de kleinste hoeveelheid water uitgedrukt in procenten van de totale hoeveelheid ingestroomd water.

Als voorbeeld de gemiddelde reistijd van instroomknoop 40 naar aankomstknoop 8 bedraagt 4.34 uur. De aankomsttijd is 0.00 uur, zodat de vertrektijd 4.34 uur eerder uit knoop 40 heeft plaatsgevonden.

De fractie die is aangekomen over drie trajecten bedraagt 22,21% van de totale instroomhoeveelheid. De kortste reistijd is 4.21 uur over trajectnummer 2, terwijl de langste reistijd 5.53 uur is over trajectnummer 1. De aangekomen kleinste fractie is 2,286% over trajectnummer 1 en de grootste fractie is 13,096% over trajectnummer 2.

Is ook gekozen voor een troebelingsberekening voor de afnameknoop, dan levert REISTEGEN deze gegevens ook in ****Naam.R*, deze bevat dan eveneens de volgende gegevens (tabel 7):

De troebeling van het water in knoop 8 met aankomsttijdstip 0.00 uur						
instroom- knoop	aandeel van totale troebeling	minimale troebeling (trajectnummer)			maximale troebeling (trajectnummer)	
1	0.008	0.0008571	(	1	)	0.0009000 (2)
40	0.030	0.0026582	(	1	)	0.0209543 (2)
47	0.020	0.0017718	(	1	)	0.0155154 (2)
86	0.090	0.0048571	(	1	)	0.0831920 (2)
84	0.006	0.0006582	(	1	)	0.0209543 (2)
76	0.006	0.0000718	(	1	)	0.0002354 (2)

aankomstknoop	:	8			
gemiddelde reistijd	:	3.41	uur		
troebeling	:	0.16000000	FTU		
aankomend water	:	100.0000	%		
minimale troebeling	:	0.00277178	FTU	(via trajectnummer	1 van instroomknoop 47)
maximale troebeling	:	0.08319204	FTU	(via trajectnummer	2 van instroomknoop 1)

tabel 7 Uitvoer REISTEGEN; troebeling voor knoop 8 met aankomsttijdstip 0.00 uur en de trajectnummers.

De tabel bevat de volgende informatie:

.Instroomknoop:

het nummer van de instroomknoop waar het water vandaan gekomen is;

.het aandeel in de totale troebeling:

het aandeel dat de troebeling op een instroomknoop heeft op de totale troebeling in de aankomstknoop; dit is een relatief getal;

.minimale troebeling:

het traject dat het kleinste aandeel heeft op het in de vorige kolom genoemde aandeel;

.maximale troebeling:

het traject dat het grootste aandeel heeft op het genoemde aandeel;

Als voorbeeld wordt hier een berekening gegeven voor aankomstknoop 8 op aankomsttijdstip 0.00 uur. De bijdrage in de troebeling door instroomknoop 40 is 0,03 FTU. De minimale bijdrage is 0,00265 over traject 1 en de maximale bijdrage is 0,02095 over traject 2.

Eveneens worden voor de aankomstknoop vermeld (onderaan de tabel):

.gemiddelde reistijd:

de gemiddelde reistijd van alle trajecten van de instroomknopen naar de afnameknoop;

.troebeling:

de troebeling op de aankomstknop, zoals die berekend is in TROEBEL (een subroutine van REISTEGEN) door middel van het gewogen gemiddelde;

.aankomend water:

het getraceerde percentage water dat gearriveerd is in de aankomstknop, dit is mede afhankelijk van het afbreekcriterium;

.minimale troebeling:

het traject dat het kleinste aandeel heeft in de totale troebeling in de aankomstknop;

.maximale troebeling:

het traject dat het grootste aandeel heeft in de totale troebeling in de aankomstknop.

Verder levert REISTEGEN ook de volgende drie files:

- ****Naam.Rtt: vastlegging per afnameknop van alle trajecten met reistijden en fracties;
- ****Naam.Rtk: de, per instroomknop bepaalde, gemiddelde reistijden en totaal aangekomen fracties;
- ****Naam.T*: registratie per afnameknop van alle trajecten vanaf de instroomknopen.

Zowel voor REISMEE als voor REISTEGEN geldt, dat in de uitvoer selecties zijn op te geven waarmee alleen die trajecten met reistijden groter dan een bepaalde tijd en/of fracties groter dan een bepaald percentage worden uitgevoerd.

III.4.3 In- en uitvoerstructuur van SCHAT

Fig. 64 toont de gegevensstromen van het facultatieve hulpprogramma SCHAT. De invoer voor SCHAT bestaat uit:

- dezelfde invoergegevens als DYNA;
- gegevens ten behoeve van het uitvoeren van de correcties;
- de te corrigeren uitvoer van DYNA.

De uiteindelijke (eventueel) gecorrigeerde uitvoer van SCHAT is vervolgens weer de gecorrigeerde invoer voor DYNA.

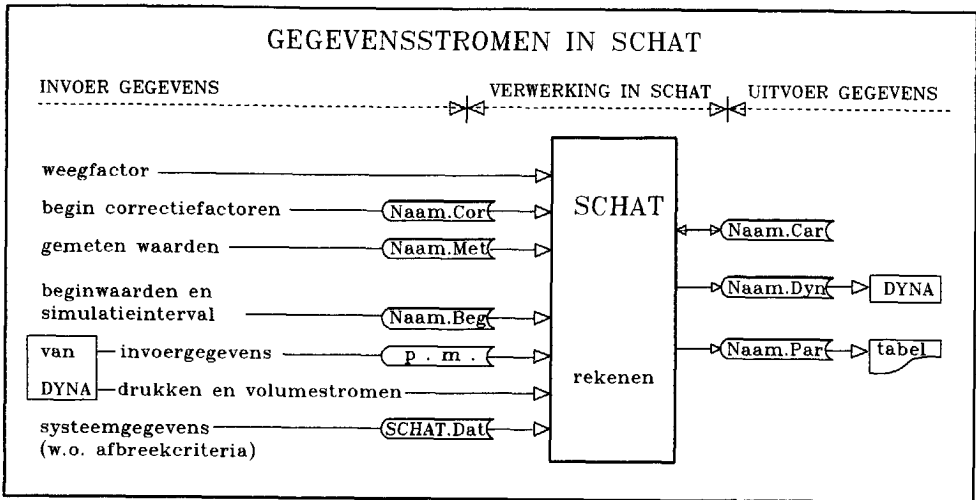


fig. 64 Gegevensstromen in SCHAT.

Nadere beschrijving van de in het bestand opgenomen en in fig. 64 weergegeven files:

De invoer

- Naam.Cor:** beginwaarden van de correctiefactoren (in het algemeen de waarde 1);
- Naam.Met:** tijdstippen van ijking, de gemeten waarden (volumestromen en drukken) en de weegfactoren toegekend aan de gemeten waarden;
- Naam.Beg:** beginwaarde voor de bufferdrukken en de pompinstromen en de gekozen tijdsperiode van $t=t_0$ tot $t=t_{eind}$;
- SCHAT.Dat:** soortgelijke file als DYN.Dat; bevat de parameters voor het numerieke rekenproces, het aantal iteraties ter bepaling van de eindcorrecties en de buisnummers waar gemeten is.

De uitvoer

- Naam.Dyn:** bevat de eindwaarden van de correctiefactoren; het is een facultatieve invoerfile voor DYNA (fig. 60);
- Naam.Car:** dezelfde eindwaarden geschikt voor (indien gewenst) verdere correctie, worden dan als nieuwe beginwaarden (als Naam.Cor) ingelezen;
- Naar.Par:** controle file, hierin worden de uitkomsten van alle afzonderlijke iteratiestappen vastgelegd.

III.4.4 In- en uitvoerstructuur van GRAPH

Het facultatieve hulpprogramma GRAPH gebruikt de reeds beschreven uitvoeren van de hoofdprogramma's en bewerkt deze voor een grafische uitvoer, zie fig. 65.

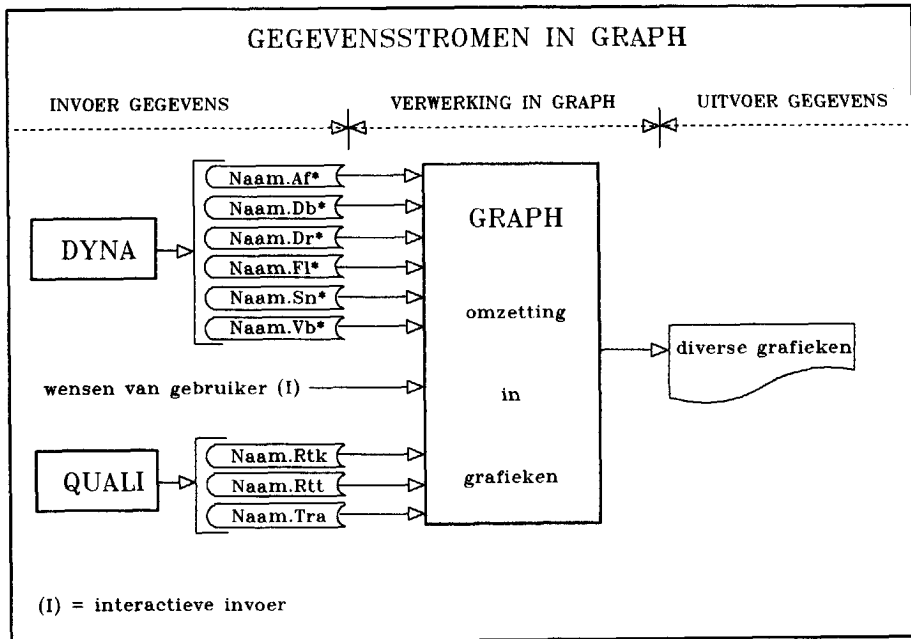


fig. 65 Gegevensstromen in GRAPH.

Testen en toetsen zijn noodzakelijke stappen die uitgevoerd moeten worden voordat het ontwikkelde rekenmodel kan worden toegepast.

Onder testen wordt verstaan het onderzoeken van de werking van het rekenmodel en de functionaliteit van de programmatuur.

Onder toetsen wordt verstaan het onderzoeken van de werking van het rekenmodel in de praktijk, het nagaan van effecten van gevoeligheden in parameterwaarden op de berekeningsuitkomsten en de betrouwbaarheid van de berekende voorspellingen.

Ten behoeve van het testen is gebruik gemaakt van vele hypothetische netwerken die representatief zijn voor bepaalde (deel)aspecten zoals: het testen van berekeningen, de optredende kwaliteitsprocessen en nabootsing van netconfiguraties.

De testfase is zeer uitgebreid geweest. Van het totale aantal verschillende testen zijn slechts de meest interessante en relevante ter illustratie in dit proefschrift weergegeven.

Tijdens het testen stonden de volgende aspecten en vragen centraal:

- de correcte werking van het rekenmodel (bijvoorbeeld bij kleine drukverschillen, de stabiliteit van de gebruikte oplosmethode);
- de werking van de programmatuur (de deelprogramma's, de subroutines en de modulaire opzet);
- de berekeningsresultaten in relatie tot de gekozen grootte van de parameterwaarden;
- voldoen de gebruiksmogelijkheden aan het pakket van eisen?

Doordat bij het testen gebruik wordt gemaakt van fictieve invoergegevens kan controle van de berekeningsresultaten op basis van werkelijke (meet)waarden niet plaatsvinden. Evenzo zijn meetfouten, afwijkingen van toegepaste waarden en onderlinge beïnvloeding van afzonderlijke deelprocessen die in werkelijkheid wel optreden, in deze testfase dus uitgesloten.

Vervolgens heeft toetsing van het programma op een drietal bestaande netwerken plaatsgevonden. Hierbij zijn vergelijkingen gemaakt met uitgevoerde metingen terwijl tevens de gevoeligheid van de grootte van de parameterwaarden op de berekeningsuitkomsten wordt geïllustreerd. Voor een uitgebreide beschrijving van de toetsing wordt verwezen naar lit. 25.

Algemeen zijn nog de volgende opmerkingen te maken.

Waterleidingnetwerken zijn doorgaans zeer beperkt uitgerust met mogelijkheden voor het uitvoeren van metingen. Vaak zijn slechts enkele druk- en volumestroommetingen mogelijk. Ten tijde van de start van de toetsing op praktijknetten speelde deze problematiek. In de loop van de tijd, met name in 1989, is hierin enigszins verandering gekomen. (Onder andere door de ontwikkeling en toepassing van een nauwkeurige insteek-snelheidsmeter geschikt voor uiterst lage en sterk fluctuerende snelheden en het kunnen inzetten van mobiele meetcabines voor het meten van EGV, troebelings, enzovoort).

Voor de figuren van de berekeningsresultaten behorend bij dit hoofdstuk wordt verwezen naar bijlage 4 fig. 1 tot en met 20.

IV.1 UITVOERING

Weliswaar zijn er diverse testnetten gebruikt voor de uitvoering van de testfase, in dit proefschrift worden er slechts twee beschreven en wel een vermaasd netwerk dat in twee uitvoeringen is toegepast namelijk: "H₂O-GROOT" en "H₂O-KLEIN"; als een nabootsing van het primaire, respectievelijk leveringsniveau.

De toevoeging "GROOT" duidt op het feit dat de afmetingen van de buismiddellijnen zodanig zijn gekozen dat deze overeenkomen met het primaire en regionale niveau. De toevoeging "KLEIN" geeft de afmetingen op leveringsniveau weer.

Fig. 1a toont het testnet en de leidinggegevens.

Dit testnet is zodanig gekozen dat enerzijds voldoende gebruiksmogelijkheden van het programma kunnen worden beproefd, terwijl anderzijds de overzichtelijkheid gewaarborgd blijft.

De twee instromen zijn afkomstig van pompen die (ver) buiten de systeemgrenzen zijn gesitueerd, zodat de instroomhoeveelheden door meting als bekend verondersteld worden.

Verder zijn twee afnameknopen opgenomen.

Het testnet "H₂O-GROOT" is overeenkomstig de werkelijkheid, voorzien van een watertoren. Fig. 1b geeft zowel de afzonderlijke als de totale instromen en afnamen tijdsafhankelijk weer. De instroomhoeveelheden zijn ongeveer gelijk verdeeld over de instromen I en II. Belangrijk is dat de totale instromen en afnamen ongelijk aan elkaar zijn, zodat de watertoren in "H₂O GROOT" een bergingsfunctie heeft.

Tevens bevinden zich twee afsluiters A1 en A2 in de buizen 2 en 10. Hiermee zijn op bepaalde tijdstippen manipulaties uitgevoerd. In een andere gebruikssituatie wordt bovendien nog een aanjager in buis 9 geplaatst.

Duidelijkheidshalve wordt vermeld dat alle gekozen waarden niet meer dan een illustratief karakter hebben en dat de uitkomsten zeker niet van praktische betekenis behoeven te zijn.

Uitgaande van deze algemene gegevens zal een aantal onderzochte mogelijkheden beschreven worden. Dit zijn allereerst mogelijkheden met alleen het basisprogramma DYNA, vervolgens DYNA en SCHAT, en daarna combinaties met QUALI:

- DYNA op "H₂O-GROOT"
 - * invloed van de watertorencapaciteit;
 - * gebruik van afsluiters;
 - * verandering van de instroomverdeling;
 - * gebruik van een aanjager;
 - * samenvoegen van buizen;
 - * simulatie van een lek.

- DYNA en SCHAT op "H₂O-GROOT"
 - * het corrigeren met het programma SCHAT.

- DYNA + QUALI op "H₂O-GROOT"
 - * bepaling van reistijden, trajecten, herkomst en troebelings van het afgenomen water in een knoop.

- DYNA + QUALI op "H₂O-KLEIN"
 - * tonen van de invloed van de impulsterm op het leveringsniveau;
 - * bepaling van reistijden, trajecten, herkomst en troebelings van het afgenomen water in een knoop op leveringsniveau.

Voor de toetsing op praktijknetten zijn voor ieder hiërarchisch niveau verschillende representatieve bestaande netten gekozen, te weten:

- het transportnet Leiduin-Amsterdam dat zich op primair niveau bevindt; de moeilijkheidsgraad wordt hier vooral gevormd door het goed schatten van de k-waarden;
- het distributienet te Amsterdam-Noord dat zich op primair- en regionaal niveau bevindt; hier zijn eveneens de k-waarden maar ook de ζ -waarden onbekend, terwijl bovendien de verdeling van de verbruiken over dit net gemodelleerd moet worden; het totale verbruik en de totale instroom zijn wel bekend; bij het toetsen kan gebruik worden gemaakt van de verschillende Cl en EGV waarden van de twee aanwezige watersoorten;
- een distributienet op leveringsniveau in de Molenwijk te Amsterdam-Noord; voor dit net zijn de k-waarden als bekend te veronderstellen omdat het geheel uit PVC is uitgevoerd (hydraulisch glad) en tamelijk nieuw is; het accent ligt vooral op de invloed van de inertantie- of impulsterm, die door het sterk fluctuerende afnamegedrag het hydraulische beeld bepaalt;
- een (toekomstige) uitbreiding op leveringsniveau in de Middelveldsche Akerpolder, waarvoor een voorspelling is uitgevoerd van het aantal stromingstrajecten van een instroom naar een afnameknoop; centraal hierbij staat de keuze van de invoerstapgrootte.

Voor de bovenstaande praktijknetten zijn de volgende berekeningen uitgevoerd:

- DYNA, ALEID en WANACA op het "transportnet Leiduin-Amsterdam"
 - * vergelijking van de uitkomsten van de verschillende statische programma's onderling en met metingen;
 - * Gevoeligheid van de wandwrijving (k-waarden).

- DYNA op het "distributienet Amsterdam-Noord"
 - * gevoeligheid van de k- en -waarden;
 - * vergelijking met meting.

- DYNA + QUALI op het "distributienet Amsterdam-Noord"
 - * gevoeligheid van de afnameverdeling op de herkomst van het afgenomen water in een knoop;
 - * vergelijking met meting.

- DYNA op leveringsniveau in de "Molenwijk"
 - * werking van een door een ruissignaal gesimuleerd fluctuerend afnamepatroon;
 - * vergelijking met meting;
 - * aandeel van de impulsterm.

- DYNA + QUALI op leveringsniveau in de "Middelveldsche Akerpolder"
 - * gevoeligheid van keuze invoer- en rekestapgrootte op het aantal stromingstrajecten;
 - * illustratie van een gemeten fluctuerend druk- en snelheidspatroon.

Gerelateerd aan de theorie (II.6.2) en aan snelheidsmetingen (lit.25) op de verschillende hiërarchische niveaus bij de daarin optredende processen met hun tijdconstanten is als richtlijn voor de keuze van invoer- respectievelijk rekestapgrootte onderstaand schema aangehouden:

Primair niveau	invoerstep: 1 uur,	rekestap: 15 minuten
Regionaal niveau	invoerstep: 15 minuten,	rekestap: 5 minuten
Leveringsniveau	invoerstep: 5 minuten,	rekestap: 1 minuut

Invloed van de watertorencapaciteit

De invoerstapgrootte is 1 uur en de rekenstapgrootte 15 minuten.

Voor de bepaling van de invloed van de buffercapaciteit is gekozen voor een drietal grootten van het watertorenoppervlak A, waaruit de torencapaciteit C volgt ($A=100 \text{ m}^2$, 200 m^2 en 500 m^2).

Fig. 2a toont het berekende drukverloop in knooppunt 3, afhankelijk van de torencapaciteit. De verwachting dat een grotere capaciteit een vlakker verloop van de druk tot gevolg heeft, komt overeen met de berekeningsresultaten.

De druktoename tussen 6.00 en 10.00 uur is het gevolg van het positieve verschil tussen de instroom- en afnamehoeveelheid. Daardoor vult de toren zich, de daarop volgende drukdaling is een gevolg van de dan grotere afname. Een dergelijk drukverloop wordt ook gevonden in afnameknoop 6.

Voor de verdere beschouwingen wordt een watertoren oppervlak $A = 200 \text{ m}^2$ aangehouden.

Gebruik afsluiters

De invoerstapgrootte is 1 uur en de rekenstapgrootte 5 minuten.

De afsluiters A1 in buis 2 en A2 in buis 10 zijn respectievelijk gedeeltelijk en geheel dichtgezet.

In fig. 2b worden de drukverlopen in knoop 6 weergegeven wanneer de beide afsluiters geheel open of dicht gezet zijn van 06.00 tot 12.00 uur met een herhaling van 15.00 tot 20.00 uur. In de tusseliggende periode staan de afsluiters geheel open. De gevolgen voor de snelheden in de buizen 2 en 7 (bij manipuleren van de afsluiters in verschillende standen) zijn weergegeven in de figuren 2c en 2d. De snelheidsverhoging in buis 7 wordt verklaard doordat de gehele volumestroom I nu slechts over de twee afvoerende buizen 6 en 7 verdeeld wordt.

Verandering instroomverdeling

De invoerstapgrootte is 1 uur en de rekenstapgrootte 15 minuten.

Om de gevolgen van een wijziging van de instromen te kunnen onderzoeken is de grootte van instroom II zodanig veranderd dat deze nu circa 25% van zijn oorspronkelijke waarde bedraagt. Instroom I is hieraan aangepast, zodat de totale levering aan het net weer gelijk is (fig. 3a). Er zijn geen gevolgen voor de druk in knoop 6 (fig. 3b).

De berekende snelheden in de buizen 7 en 9 zijn weergegeven in fig. 3c en 3d.

Geheel volgens het verwachtingspatroon is de snelheid in bijvoorbeeld buis 7 hoger door de nu grotere instroom I. De snelheid in buis 9 is daarentegen lager en de stromingsrichting verandert een aantal keren. Het water pendelt, met als gevolg een stagnatiezone in de desbetreffende buis.

Gebruik van een aanjager in het net

De invoerstapgrootte is 1 uur en de rekenstapgrootte 5 minuten.

Wanneer een pomp binnen een net is opgenomen, wordt gesproken van een aanjager. Om het effect hiervan te illustreren, is het testnet enigszins aangepast. De watertoren is verplaatst naar knoop 2 terwijl de aanjager in buis 9 nu centraal in het net is gesitueerd. De grootte van instroomhoeveelheid II is gevoegd bij I en vervalt hiermee, knoop 4 dient nu als stuurpunt voor het in en uit bedrijf nemen van de aanjager. De afnamen zijn ongewijzigd. In dit voorbeeld (fig. 4) komt de aanjager in bedrijf wanneer het drukverloop in knoop 4 de minimumgrens van 22,5 mwk (225 kPa) onder-schrijft. Bij het bereiken van bijvoorbeeld 25 mwk (250 kPa) schakelt deze uit; snelheidsveranderingen door het gehele net zijn een direct gevolg. Zo wordt de snelheid in buis 9 sterk vergroot, evenals in buis 3, terwijl in buis 8 de stroming omkeert. In dit theoretische geval wordt duidelijk het "rondpompen" aangetoond. Na uitschakelen van de aanjager herstelt de oorspronkelijke situatie zich.

Samenvoegen van buizen

De invoerstapgrootte is 1 uur en de rekenstapgrootte 15 minuten.

Voor het kunnen verkleinen van het aantal buizen en knopen en daarmee het vereenvoudigen van een netwerk is het kunnen samenvoegen van zowel parallelle als van seriële buizen noodzakelijk. De hierdoor te bereiken dimensieverkleining van de toestandsvector waarin de buisstromen zijn opgenomen, betekent een aanzienlijke rekentijdverkortung.

Voorwaarde is dat dit op een zodanige wijze gebeurt, dat de stroming in het net "hydraulisch equivalent" blijft.

Het facultatieve hulpprogramma WEERSTAND bevat een algoritme voor het samenvoegen van buizen.

Het oorspronkelijke testnet is nu weer enigszins veranderd, namelijk door een extra buis 11 die in serie of parallel met buis 2 loopt (fig. 5). Het resultaat van de samenvoegingen is eveneens weergegeven in deze figuren. Naast de afzonderlijke buiskarakteristieken van de buizen 2 en 11 zijn de vervangende weerstandswaarden gegeven voor respectievelijk de parallelle en de seriële vervanging. Na de samenvoeging is de genoemde hydraulische equivalentie bereikt. Bij het handmatig samenvoegen van buizen vereist dit, naast kennis en inzicht in het functioneren van een net, veel tijd en inspanning om tot redelijke schattingen van weerstandswaarden te komen. Het (grote) voordeel van bovenbeschreven geautomatiseerde methode is niet alleen de te behalen verkortung van de rekentijd, maar vooral de handhaving van de volledigheid van het leidingnetwerk. In principe wordt er immers niets verwaarloosd.

De handmatige methode geeft voor een dergelijk eenvoudig testnet, met slechts twee buizen die samengevoegd worden, gelijke resultaten als bij geautomatiseerd samenvoegen.

Controle dat de automatische samenvoegingsmethode betere resultaten geeft dan de handmethode is alleen goed mogelijk bij complexe (werkelijke) netwerken. Zie hiervoor de toepassing op een werkelijk netwerk in lit. 25 onder "Dimensieverkleining door samenvoeging" hoofdstuk III.2.

Simulatie van een lek

De invoerstapgrootte is 1 uur en de rekenstapgrootte 1 minuut.

Om het rekenmodel te testen op goede werking bij leksimulaties zijn diverse lekberekeningen uitgevoerd. Fig. 6 toont de situatie voor het geval zich een spontaan lek voordoet in buis 5 van testnet "H₂O-GROOT". Een nieuw knooppunt 8 is hiervoor aangenomen. De grootte van de uittredende hoeveelheid is drukafhankelijk namelijk ΔP ter plaatse van het lek, waarbij het drukverschil de overdruk is ten opzichte van de atmosferische druk.

De duur van het lek bedraagt bij deze berekening 10 minuten waarbij de aanvang ligt op 7.20 uur. Om 7.30 uur wordt een aanvang gemaakt met herstel, waarna om 7.40 uur de oorspronkelijke situatie weer ingaat.

De orde van grootte van het lek bedraagt circa 1350 m³/uur, waarbij de buisopening ter plaatse van het lek nagenoeg de grootte van de desbetreffende buismiddellijn is.

Door dat in dit geval zowel de instromen als de afnamen ongewijzigd blijven, wordt de extra benodigde levering als gevolg van het lek door de watertoren geleverd.

Het waterniveau in de toren daalt hierbij van 25 m naar circa 23,5 m. Bij de torenoppervlakte $A = 200 \text{ m}^2$ is circa 300 m³ uit de watertoren geleverd.

De stroming in buis 5 is geheel gewijzigd, in buisdeel 5A treedt een aanzienlijke verhoging van de stroomsnelheid op, terwijl in buisdeel 5B de stroming omkeert.

Het corrigeren met programma SCHAT

De invoerstapgrootte is 1 uur en de rekenstapgrootte 20 minuten.

Om de werking van het deelprogramma SCHAT te testen is ter illustratie één van de oorspronkelijk gekozen waarden voor de buisweerstand veranderd.

Stel dat bij het schematiseren van de werkelijkheid een onjuiste k-waarde is aangenomen, hetgeen is nagebootst door buis 2 een 100 maal grotere k-waarde te geven (dus $k = 20$ mm in plaats van 0,2 mm). De meetwaarde, zijnde de bekend veronderstelde correcte waarde, wijkt dan ook sterk af van de berekende waarde voor buis 2, zie fig. 7. Indien nu met SCHAT wordt gecorrigeerd, volgt de gecorrigeerde berekening nu exact de meetwaarde.

Voor buis 6 toont de figuur de uitslag van de berekende stromingen vóór en na corrigeren op buis 2. Bij gebrek aan een meetwaarde voor buis 6 is nu niets te zeggen over de opgetreden verandering voor de stroming in deze buis.

Gezien de kleine dimensie van dit net (aantal buizen slechts 10) is ook het aantal mogelijkheden om te corrigeren beperkt. Een verandering in één buis kan dus al snel (grote) veranderingen voor de stromingen in andere buizen teweegbrengen.

Voor deze situatie hoeft hieraan niet veel waarde te worden gehecht, daar bij werkelijke netten veel meer buizen aanwezig zijn.

Voor verschillende testnetten en verschillende omstandigheden blijkt steeds dat na 2 à 3 iteraties de grootste correcties zijn behaald. Zo ook voor dit testnet.

Bepaling reis- en verblijftijden, trajecten, herkomsten en troebeligen

Nu volgen enkele testberekeningen met het facultatieve programma QUALI. Zowel de netconfiguratie als de buis- en de overige gegevens voor afnamen en instromen komen overeen met fig. 1.

Teneinde de belangrijkheid en de relatie van de invoerstap c.g. rekenstapgrootte met het hiërarchisch niveau te illustreren, zijn voor de stromingsberekeningen met DYNA de invoerstappen groot en klein gekozen (1 uur respectievelijk 5 minuten). Afhankelijk van

het hiërarchisch niveau zijn de invoerstappen voor QUALI op 5 minuten en 1 minuut gekozen. Dit om de effecten op de kwaliteitsberekeningen (de dynamische processen, reistijden, parameterverandering enzovoort) voor beide niveaus tot uitdrukking te laten komen.

De invoer- en rekenstapgrootten zijn opgenomen in onderstaande tabel 8:

	"H ₂ O-GROOT"		"H ₂ O-KLEIN "	
	DYNA	QUALI	DYNA	QUALI
Invoerstap	1 uur	5 min.	1 uur resp. 5 min.	1 min.
Rekenstap	100 sec.	5 min.	30 sec.	1 min.

tabel 8 De gekozen invoer- en rekentijdstappen.

N.B. Voor QUALI is de rekenstap altijd gelijk aan de uitvoerstap van DYNA, dus 5 minuten ("GROOT"), respectievelijk 1 minuut ("KLEIN").

Teneinde de rol van de impulsterm op het leveringsniveau tot uitdrukking te laten komen, zijn bovendien op "H₂O-KLEIN" twee berekeningen gemaakt, respectievelijk met een invoerstap van 1 uur en 1 minuut.

De CFV in fig. 8 geeft voor "H₂O-GROOT" een beeld van de verblijftijden en van de netdoorstroming. Met REISMEE is deze bepaald voor de vier instroomtijdstippen 8.00, 14.00, 16.00 en 21.00 uur. Analyse van deze figuur leert onder andere dat de netdoorstroming op het instroomtijdstip 8.00 uur bijzonder goed is.

Er zijn weinig stromingstrajecten op dit tijdstip, met als gevolg dat binnen vier uur de gehele instroomhoeveelheid het net heeft verlaten.

Geheel anders ligt dit voor instroomtijdstip 14.00 en 21.00 uur. Hier vertoont de CFV duidelijk de invloeden van de (vele) aanwezige trajecten met grote verblijftijden. Een belangrijk aspect waardoor verblijftijden groot zijn, is dat in deze trajecten de watertoren is opgenomen. Zie hiervoor vooral de trajecten van instroomknoop 5 naar de afnameknopen 3 en 6. Deze trajecten beïn-

vloeden de totale netdoorstromingstijden zodanig, dat de spreiding tussen minimum en maximum reistijd groot is.

Tabel 9 toont voor het instroomtjdstip 14.00 uur de uitvoer van de gemiddelde reistijden behorende bij een stromingstraject over de aangegeven buizen.

trajecten van het netwerk H2O									
instroomtjdstip: 14.00 uur (REISMEE)									
in. knoop	aan. knoop	tra. nummer	reistijd [uur]	fractie [%]	leidingen en watertorens in het traject				
					.: leiding w. : watertoren				
5	3	1	5.15	43.6337	4	3			
5	3	2	17.32	13.8443	4	9	8		
5	3	3	28.48	4.1786	4	9	w1	8	
5	3	4	29.24	0.0643	4	9	w1	9	8
5	3	5	27.27	0.0106	4	9	w1	9	w1 8 w1 8
5	6	1	3.08	23.9882	4	5			
5	6	2	16.20	6.6795	4	9	10		
5	6	3	30.34	0.2669	4	9	w1	9	10
5	6	4	25.51	0.0171	4	9	w1	9	w1 8 w1 10
5	6	5	42.20	0.0275	4	9	w1	9	w1 10
5	6	6	27.33	7.2857	4	9	w1	10	

tabel 9 De gemiddelde reistijden en stromingstrajecten.

De spreiding in reistijden en fracties is het directe gevolg van het (vele malen als propstroming) doorlopen van de watertoren. Hieruit blijkt voor een leidingnet het grote belang van de juiste plaats, de grootte en de doorstroming van een reinwaterberging.

Met het programma REISTEGEN zijn de kwaliteitsaspecten van het afgenomen water op de desbetreffende knopen bepaald. De figuren 9 en 10 geven voor de afnameknopen 3 en 6 de CFV voor de (willekeurig) gekozen aankomsttijdstippen 3.00 en 18.00 uur.

Tevens wordt op de aankomsttijdstippen de procentuele momentane verdeling aangegeven van de bijbehorende ingestroomde volumehoeveelheden. Ook zijn in deze figuren de maximum, gemiddelde en minimum reistijden over 24 uur uitgezet, evenals de herkomsten van het afgenomen water. In dit geval zijn dat percentages van instroom I op knoop 1 en instroom II op knoop 5.

Voor de afnameknopen 3 en 6 is met REISTEGEN de troebelingswaarde berekend, zie fig. 11. Bij een gegeven aanvangswaarde voor de troebeling van beide instromen is het verloop van de grootte van

de troebeling over het etmaal berekend. Hiervoor moeten de Fe-afgiftecoëfficiënten per doorlopen buis opgegeven worden.

Invloed van de impulsterm

Zoals reeds vermeld, is voor de uitvoering van de test op leveringsniveau de netconfiguratie gelijk gehouden, met dien verstande dat er geen watertoren is opgenomen; dit zou namelijk niet reëel zijn omdat een toren op leveringsniveau niet voorkomt.

De buismiddellijnen bedragen nu 0,1-0,16 m (zie de tabel in fig. 1a "H₂O-KLEIN").

De dominantie van de impulsterm op dit niveau wordt geïllustreerd aan de hand van twee berekeningsvoorbeelden met twee verschillende invoerstapgrootten namelijk van 1 uur respectievelijk 5 minuten (fig. 12). Fluctuaties kunnen alleen met kleine invoerstappen worden nagebootst.

Dat de invloed van deze term zodanig groot kan zijn dat het stromingsbeeld en dus de kwaliteitsgevolgen hierdoor belangrijk bepaald worden, is een direct gevolg van de optredende sterke vertragingen en versnellingen van de buisstromen ten gevolge van het sterk fluctuerend afnamegedrag.

Dit, gecombineerd met een zeer lage gemiddelde snelheid (rondom de nul), maakt dat de wandwrijvingsterm nu een ondergeschikte rol speelt in vergelijking tot de impulsterm. Dit is van belang voor kwaliteitsbeschouwingen op het leveringsniveau, omdat daar pendelende stagnatiezones voorkomen die een gevolg zijn van sterk vermaasde netten, een slechte netconfiguratie of toepassing van te veel instromen naar een wijk.

Omdat in het testnet "H₂O-KLEIN" de watertoren is weggelaten, moet de gemiddelde instroom gelijk zijn aan de gemiddelde afname. Op het leveringsniveau zullen als gevolg van het frequent variëren van de afnamen ook de stroomsnelheid en -richting sterk wisselen. Teneinde deze variaties te simuleren, wordt het ruissignaal op het gemiddelde afnamepatroon gesommeerd. Alleen bij de berekening met invoerstapgrootte van 5 minuten (DYNA) is het ruissignaal toegepast.

Uit het berekeningsresultaat volgt dat het percentage van het drukverlies ten gevolge van de impulsterm aanzienlijk kan zijn. Dit is in zowel fig. 13 als in fig 14 voor buis 3 weergegeven. Door het sterk fluctuerende verloop van de snelheid en de zeer grote snelheidsveranderingen in korte tijdsintervallen is ook de term $I\dot{\phi}$ zeer wisselend van grootte.

Ook blijkt uit de berekening dat, zodra de gemiddelde snelheid weer toeneemt, het procentuele aandeel van de impulsterm afneemt en de wandwrijvingseffecten weer gaan overheersen.

Bij fluctuerende snelheden kleiner dan circa $| 0,2 \text{ m/s} |$ domineren de impulsverliezen.

Als voornaamste conclusie kan gesteld worden dat voor beschouwingen op leveringsniveaus de tijdstapgrootten voor de invoer, respectievelijk voor het rekenen, hierbij aangepast dienen te zijn. Dit betekent concreet dat deze niveaus doorgerekend moeten worden op een invoertijdstap van circa 5 minuten of zelfs kleiner met een daaraan aangepaste rekenstap. Dit is met name van belang indien kwaliteitsbeschouwingen, zoals herkomsten, trajectbepaling, reistijden en kwaliteitsparameterveranderingen over de stromingstrajecten in een net geanalyseerd worden. Zie hiervoor bijvoorbeeld het verloop van de troebelings in fig. 15.

Opgemerkt wordt dat het hier een zeer eenvoudig netwerk betreft, in werkelijkheid gaat het om veel meer buizen en knopen, dus meer stromingstrajecten. De verschillen in drinkwaterkwaliteit zullen dan aanzienlijk groter zijn.

Op deze wijze kunnen, wanneer het om lokale normoverschrijdingen gaat, de duur van de overschrijdingsperioden en de frequenties vastgesteld worden alsmede de wisselende piekwaarden.

Toetsing met bestaande programma's en de gevoeligheid van parameterwaarden.

Daar een dynamisch rekenmodel ook statische berekeningen kan uitvoeren is naast het geheel dynamisch doorrekenen en vergelijken met meetwaarden ook een vergelijking gemaakt voor momentane stromingssituaties. Hierbij worden de uitkomsten van het basisprogramma DYNA vergeleken met die van de programma's ALEID en WANACA (bijlage 1, deel 3). Druk en stromingsberekeningen zijn uitgevoerd op het transportnet Leiduin-Amsterdam. De drukverschillen die in dit net optreden zijn significant.

De uitkomsten van de drukberekeningen en de metingen zijn weergegeven in fig. 16. Voor uitéénlopende stromingen en voor (met SCHAT) bepaalde k-waarden toont deze figuur de overeenkomst van DYNA met de twee genoemde statische programma's.

Ook is in deze figuur de invloed van verandering van k-waarden op de drukberekening voor de instroomknoop aangegeven. Vanwege het tijdsafhankelijk stromingsverloop is dit alleen met DYNA gedaan. Hiervoor zijn de oorspronkelijke door SCHAT bepaalde k-waarden vermenigvuldigd met 0,5 respectievelijk 1,5.

Voor het distributienet Amsterdam-Noord zijn met DYNA gelijksoortige berekeningen gemaakt voor de etmalen 24-2-87 en 26-7-89. De invoer- en rekenstapgrootten bedroegen voor de eerste dag respectievelijk 1 uur en 15 minuten en voor de tweede dag respectievelijk 15 en 5 minuten. Voor 24-2-87 zijn zowel de k-waarden van de buizen als één ζ -waarde van een afsluiter in een buis veranderd. In fig. 17 is geïllustreerd hoe de berekende druk in knoop 1 weinig verandert door verandering van k-waarden. Hiervoor zijn weer de factoren 0,5 en 1,5 gebruikt voor vermenigvuldiging op de door SCHAT bepaalde k-waarden. Dit is te verklaren door de sterke vermazing en de overdimensionering van dit net. De gemeten waarden voor het drukverloop in knoop 1 komen (redelijk) goed overeen met de berekende waarden. De gemiddelde afwijking ten opzichte van gemeten waarden over het gehele etmaal is circa 4%; incidenteel

komen iets hogere afwijkingen voor. Hetgeen te wijten is aan te groot gekozen tijdstappen.

De figuur toont een grotere gevoeligheid voor het drukverloop in knoop 1 als gevolg van een verandering van de afsluiterstand in een buis. Afhankelijk van de gekozen ζ -waarde kan de afwijking oplopen tot wel 10%. Dit is gedaan door de oorspronkelijke met SCHAT bepaalde ζ -waarde van deze afsluiter te vermenigvuldigen met een factor 10 respectievelijk 0,1. Een betere overeenkomst toont deze figuur voor de berekening en de meting van het drukverloop in knoop 55 voor 26-7-89. Het effect van de kleinere invoer- en rekenstap komt hier duidelijk tot uiting (gemiddelde afwijking 2%, met een enkele incidentele afwijking van 4%). De fluctuaties worden nu beter gevolgd.

Invloed van de afnameverdeling

Bij een invoerstap van 15 minuten en een rekenstap van 5 minuten wordt voor 21-8-89 in fig. 18 de invloed weergegeven van een zo goed mogelijke ("juiste") keuze van de afnameverdeling over de knopen. Dit gebied wordt gevoed met RD- en RP-water met ieder hun bijbehorende Cl en EGV waarden.

De voorspelde herkomst van het in knoop 26 afgenomen water blijkt bij een zo nauwkeurig mogelijke toewijzing van de knoopverbruiken nagenoeg uitsluitend te bestaan uit het RP-water, afkomstig van de instroom Schellingwouderbrugzinker. Vergelijk hiervoor de continu gemeten EGV waarden nabij knoop 26.

Een minder nauwkeurig bepaalde verdeling van de verbruiken heeft gevolgen voor de voorspelde herkomstberekening. Zo is bij verwisseling van de afnamen van de knopen 74 met 27 en 75 met 28 de voorspelde herkomst van het afgenomen water in knoop 26 afwijkend.

Simulatie van het afnamegedrag

Een praktijktoetsing op leveringsniveau is gemaakt voor de Molenwijk, een wijk in het distributiegebied in Amsterdam-Noord (invoerstap DYNA 5 minuten, rekenstap 1 minuut).

Naast het toetsen van de werking van het programma DYNA met gesimuleerde ruissignalen ter nabootsing van de sterk fluctuerende

afnamen zoals hier voor afnameknoop 92, is ook een vergelijking gemaakt tussen de daarbij behorende voorspelde en gemeten snelheden. Bovendien is de grootte van de impulsterm onderzocht.

In fig. 19 wordt voor een periode tussen 12.00 en 13.00 uur voor de (sterk) fluctuerende snelheid de overeenkomst getoond tussen de berekende en de gemeten waarden (uitvoerstep 5 minuten).

Door gebrek aan juiste informatie omtrent het afnamepatroon op dit niveau zou ook een minder goede nabootsing verkregen kunnen worden. Daarom is het essentieel om zowel het afname- en het snelheidspatroon op dit niveau te meten (zie aanbevelingen).

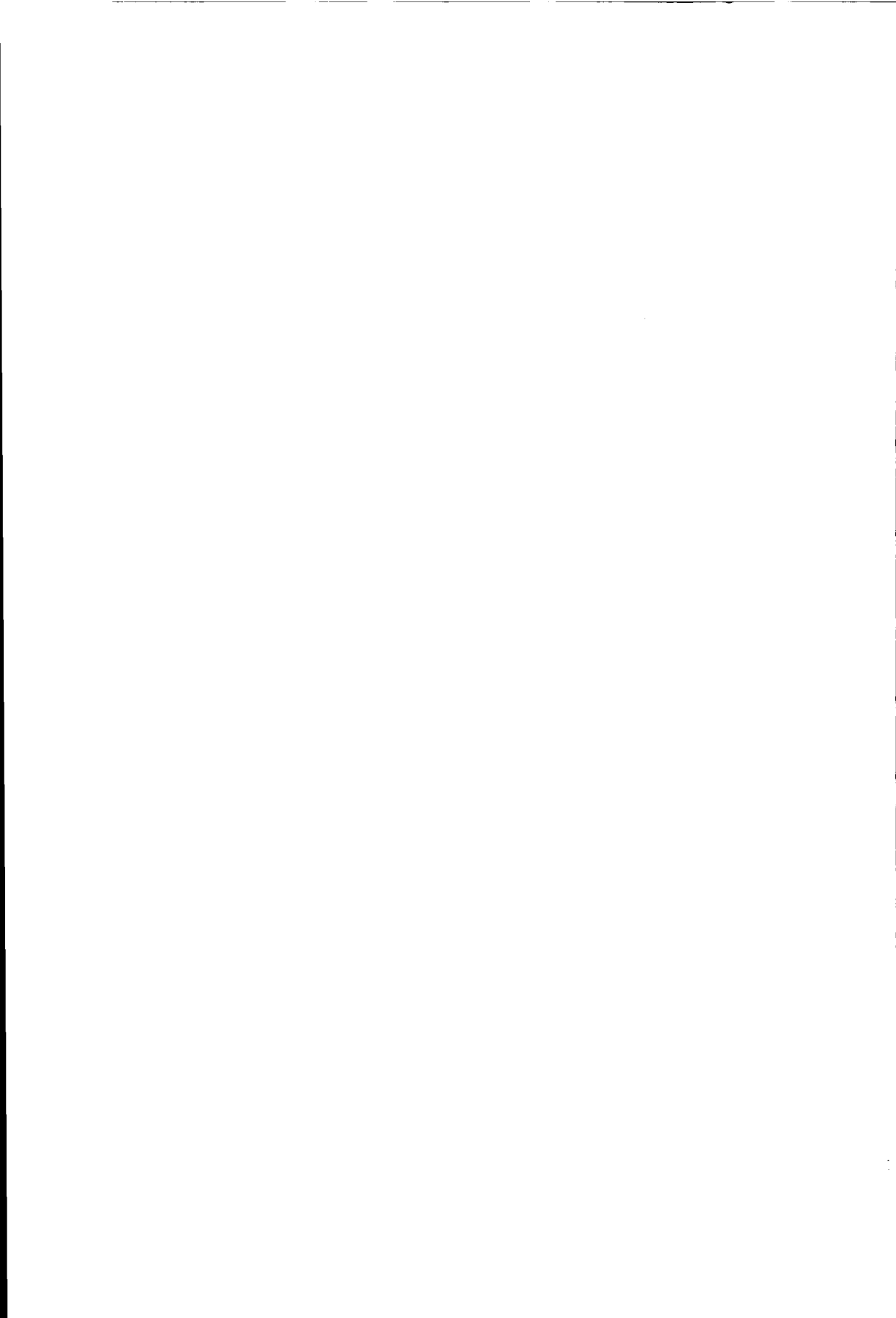
Ook wordt in deze figuur geïllustreerd dat de tijdstapkeuze belangrijk is voor het te berekenen aandeel van de impulsterm. De impulseffecten zijn niet te verwaarlozen.

Keuze invoertijdstapgrootte

Ter illustratie tot slot nog een voorspelling op een toekomstig uitbreidingsgebied gebaseerd op een zo goed mogelijk geschat gesimuleerd afnamepatroon en recent gemeten snelheden.

Op het leveringsniveau waar zich stagnatiezones, grote verblijftijden en pendelende stromingen kunnen voordoen, is de keuze van een kleine invoer- c.q. rekentijdstapgrootte belangrijk. In fig. 20 wordt voor een toekomstig uitbreidingsgebied te Amsterdam-West, de consequentie aangegeven van een berekening met een te grote invoertijdstap. In dit voorbeeld geeft de trajectberekening van instroomknoop 86 naar afnameknoop 72, bij een invoerstepgrootte voor DYNA 1 uur en QUALI 5 minuten, slechts 1 traject aan. De daarbij behorende aankomstfractie bedraagt 3,5% met een reistijd van 6.1 uur. Totaal verschillend zijn de berekeningsuitkomsten wanneer voor de invoerstep voor DYNA 5 minuten en QUALI 1 minuut wordt gekozen. In dit geval blijken er 5 trajecten aanwezig te zijn met ieder hun bijbehorende fractiegrootten en reistijden.

Volledigheidshalve zijn in deze figuur de meetstroken opgenomen van het druk- en snelheidsverloop van één van de zes reeds bestaande leidingen waarop het uitbreidingsgebied zal worden aangesloten (en dan als instromen dienst doen). Uit deze metingen blijkt duidelijk het fluctuerende karakter op dit niveau wat kan resulteren in het pendelen van de stromingen.



In de voorgaande hoofdstukken is beschreven hoe het dynamisch rekenmodel is ontwikkeld, getest en vervolgens getoetst. Ook zijn hierbij aandachtsgebieden genoemd voor nader onderzoek teneinde de resultaten later in te passen bij de modelvorming.

Onderstaand worden, uitgaande van het in hoofdstuk I.8 genoemde pakket van eisen en de bij de ontwikkeling van het rekenmodel reeds opgedane ervaringen, allereerst conclusies genoemd en vervolgens aanbevelingen gedaan.

Conclusies

- De oplossing van het stelsel differentiaalvergelijkingen kan niet analytisch gebeuren maar alleen langs numerieke weg, omdat de toestandsvector in de toestandsvergelijking I in impliciete vorm staat. Bovendien bevat deze vergelijking een kwadratische term.
- Uit de berekeningsresultaten en de toepassing op diverse testnetten onder andere op "H₂O-GROOT" en "H₂O-KLEIN" is gebleken dat de functionaliteit van het rekenmodel voldoet aan de specifieke eisen op de voorkomende hiërarchische niveaus.
- Uit de toepassing van continue tijdsafhankelijke vergelijkingen gecombineerd met de geldende theorie uit de vloeistofmechanica, blijken tijdsafhankelijke berekeningen goed mogelijk te zijn. Als gevolg van een zo abstract mogelijke benadering bij de ontwikkeling is het rekenmodel universeel en als zodanig breed toepasbaar. (Situaties met en zonder berging, pompen buiten, op de rand en binnen het netwerk gesitueerd).
- Op testnetten zijn met goed gevolg simulatieberekeningen aan de hand van tijdsafhankelijke functies uitgevoerd voor de instrumenten, de afnamen en de stromingsafhankelijke pompkarakteristieken en weerstandskrommen door toepassing van splinefuncties die goede mogelijkheden hiervoor geven. Om de bruikbaarheid in de praktijk te beoordelen is toetsing op werkelijke netten uitgevoerd.

- De keuze van de rekentijdstapgrootte bij het numeriek oplossen bleek afhankelijk van het door te rekenen probleem. Bepalend voor de keuze is het hiërarchisch niveau van het netwerk en/of de doelstelling van de berekening (ontwerp, beheer, kwaliteitsonderzoek, leksimulatie).

Op grond van simulatieberekeningen op testnetten blijkt dat leveringsniveaus doorgerekend dienen te worden met een invoerstapgrootte van 5 minuten of kleiner en een daaraan aangepaste rekenstapgrootte.

- Bij de theorie is volledig rekening gehouden met alle mogelijke drukverschillen (inclusief drukverliezen als gevolg van niet-omkeerbare energie-omzettingen).

In de testnetten zijn de drukverschillen afzonderlijk onderzocht op belangrijkheid voor de verschillende hiërarchische niveaus. Zo bleek dat, in verband met het sterk fluctuerende karakter van het afnamepatroon op leveringsniveau, het drukverschil ten gevolge van de impulsterm een niet te verwaarlozen grootte is. Op testnet "H₂O-KLEIN" werden hiervoor simulatieberekeningen uitgevoerd met representatieve afnamepatronen.

In heuvelachtige gebieden mag de statische drukhoogte niet verwaarloosd worden.

- Berekeningen op test- en bestaande netten met zowel (verschillende) "statische rekenmodellen" als het "dynamische rekenmodel" geven aan dat de problematiek van de sterke vermazing en overdimensionering van netwerken, met als gevolg zeer kleine drukverschillen, in verband met de benodigde nauwkeurigheid de volgende oplosvolgorde vereist: eerst de berekening van stromingen in de buizen (en de peilen in de buffers) gevolgd door drukberekeningen in de knopen.

- Uit testberekeningen blijkt dat de oplossingsmethode via de meerstapsmethode, gebruikmakend van de Backward Differentiation Formulas, een (snelle) methode is die geen instabiliteit geeft voor netten waarin zowel kleine als grote leidinglengten zijn

opgenomen en waarin processen met kleine en grote tijdconstanten voorkomen.

- Uit een vergelijking van de uitkomsten van (bestaande) statische rekenprogramma's op een bestaand net blijkt dat het basisprogramma DYNA overeenkomstige berekeningsresultaten geeft voor momentane drukken en stromingen, evenzo voor vergelijking met gemeten waarden.
- De berekeningsresultaten zijn (sterk) afhankelijk van de nauwkeurigheid van de ingevoerde waarden. De gevoeligheid ten aanzien van de juiste keuze, kan groot zijn. Voordat tot toepassing van een rekenmodel wordt overgegaan is calibratie een belangrijke en noodzakelijke stap.
- In de praktijk is het niet doenlijk van een netwerk de exacte weerstandswaarden te bepalen. De gevraagde toepassing van correctiemogelijkheden op geschatte weerstandswaarden is met het deelprogramma SCHAT opgelost. Daar zuiver wiskundige identificatie niet mogelijk blijkt, is gebruik gemaakt van de kleinste kwadratenmethode ter uitvoering van de praktische identificatiemethode. De werking van het programma is onder andere getest op "H₂O-GROOT" (de wisselingen in het snelheidsverloop zijn hier relatief klein vergeleken met de gemiddelde waarde). Nog niet is gebleken of deze methode goed bruikbaar is op leveringsniveau.
- Het deelprogramma WEERSTAND is bruikbaar gebleken voor het vereenvoudigen van netwerken. Door samenvoeging van parallelle en seriële buizen kan verkleining van dimensies en zodoende verkorting van rekentijden verkregen worden. In de theorie werden genoemd:
 - * rekenregels waaraan voldaan zou moeten worden voor de hydraulische equivalentie; hieraan is echter zuiver wiskundig niet te voldoen (3 onbekenden en 2 vergelijkingen);

* gebruik van splinefuncties voor de bepaling van de weerstandskarakteristieken voor samengevoegde buizen; deze methode omzeilt bovengenoemd probleem en is in lit. 25 onder III.2 toegepast op een transportnet.

* decompositie van een systeem in subsystemen; gebruik van deze methode bij drinkwaternetten is nog niet voldoende ontwikkeld.

- Met het deelprogramma QUALI kunnen de gevraagde kwaliteitsparameters worden berekend. De methoden "met de stroming mee" (REISMEE) en "tegen de stroming in" (REISTEGEN) geven onderzoeksmogelijkheden voor het totale distributiegebied en voor lokale beschouwingen. Juist met REISTEGEN zijn voor een afnameknop de duur van eventuele normoverschrijdingen van een parameter en de frequentie hiervan vast te stellen.

De nauwkeurigheid van de berekeningen met QUALI zijn sterk afhankelijk van de snelheidsbepaling (met DYNA).

De bepaling van de verblijftijd is gebaseerd op de integratie van de snelheidsfunctie.

Juist op leveringsniveau, waar zich kwaliteitsproblemen voordoen, is het gezien het sterk wisselende karakter van de snelheid van belang zo weinig mogelijk informatieverlies te hebben. Een zo nauwkeurig mogelijke snelheidsbepaling is vereist.

- Het nut en de problematiek van toepassing van wijk-regelkringen ten behoeve van de verbetering van de waterkwaliteit is aangegeven, echter niet verder uitgewerkt.
- Door het introduceren van drukafhankelijke afnamen (zoals een lek) in een knoop zijn calamiteitsberekeningen uitgevoerd. Het rekenmodel blijkt nuttig bij toepassing van de "pijpleidingcode" en voor het opstellen van zogenaamde "sluitingsprogramma's" (het sluiten van afsluiters op kritieke plaatsen in het net).
- Inherent aan het dynamisch rekenen is de grote hoeveelheid uitvoergegevens. Het beoordelen door middel van tabellen is niet goed mogelijk. Grafieken zijn onontbeerlijk. Voor gra-

fische presentatie is daarom het deelprogramma GRAPH ontwikkeld. Presentatie gebaseerd op de topografie is in ontwikkeling.

- De modulaire opbouw van de programmatuur maakt het niet alleen mogelijk dat aanpassingen op onderdelen snel en overzichtelijk kunnen plaatsvinden, de afzonderlijke delen kunnen ook eenvoudig op testnetten worden uitgetest.
- De ontwikkelde programmatuur is goed bruikbaar gebleken op de verschillende test- en praktijknetten. De berekeningsresultaten zijn niet tegenstrijdig met verwachtingen gebaseerd op kennis en ervaring en komen overeen met de werkelijkheid. Dit niet alleen ten aanzien van de drukken en de snelheden maar ook voor de overige kwaliteitsaspecten (reistijden, trajecten, herkomsten van het water en parameterverloop over trajecten).

Aanbevelingen

- Nader onderzoek zal moeten plaatsvinden aangaande het identificeren van niet-lineaire systemen zoals het onderhavige en in het bijzonder die systemen waarin een singuliere matrix in de differentiaalvergelijking voorkomt.
- Nadere toetsing zal verricht moeten worden of het programma SCHAT goed toepasbaar is op alle hiërarchische niveaus en in het bijzonder op het leveringsniveau. Op dit niveau treden namelijk sterke wisselingen op in het snelheidspatroon rond een extreem lage gemiddelde waarde. Mogelijk zal een statistische verwerking van het gemeten snelheidsverloop nodig zijn over een (identificatie)periode om te komen tot goed bruikbare meetwaarden. Ook zal moeten worden onderzocht of de relatief grotere invloed van de wandaangroei zou moeten leiden tot een verdere differentiatie van correcties op geschatte weerstandsbepalende parameters.

- De samenvoegingsmethode waarbij gebruik wordt gemaakt van splines zal verder ontwikkeld moeten worden met het oog op rekentijdverkorting.

- Nader onderzoek is gewenst om decompositie toepasbaar te maken voor drinkwaternetwerken, met name op de problematiek van de onderlinge beïnvloeding van de afzonderlijke deelgebieden op de verschillende hiërarchische niveaus.
In lit. 17 wordt een aanzet gegeven voor lineaire systemen en in lit. 18 voor de niet-lineaire systemen.

- Nadere studie dient uitgevoerd te worden naar afnamepatronen op leveringsniveau

- Nadere studie dient uitgevoerd te worden naar toepassing (en verbetering) van regelkringen speciaal op leveringsniveau.

- Nadere toetsing (op de werkelijkheid) van leksimulaties dient uitgevoerd te worden.

- Grafische presentatie van berekeningsresultaten gebaseerd op de topografie van een netwerk dient verder ontwikkeld te worden.

In het totale proces van winning tot levering van drinkwater van een zo goed mogelijke kwaliteit aan de consument is het distributieproces de laatste fase. Dit is een uitermate belangrijke fase waarbij juist de kwaliteitsborging van het produkt drinkwater tijdens het verblijf in het distributienet in relatie tot de investerings- en exploitatiekosten zeker zoveel aandacht verdient als tijdens de voorafgaande deelprocessen (winning en zuivering). De centrale plaats die het dynamisch rekenmodel binnen een multidisciplinaire aanpak van problemen inneemt, komt naar voren bij de wisselwerking tussen de civieltechnische, hydraulische, chemische en biologische disciplines die alle bij het distributieproces een rol spelen.

Bij de interactieve processen tussen het drinkwater en de leidingmaterialen speelt de tijd een centrale rol. De tijdsafhankelijkheid van de processen kan alleen op bevredigende wijze benaderd worden door toepassing van een dynamisch rekenmodel. Bij bestaande netwerken is het van belang dat de werkelijke (gemeten) parameters de basis zijn voor de juiste uitkomsten van de voorspellingen. Bij het ontwerpen van (nieuwe) netwerken inclusief bijbehorende pompstations, reservoirs, enzovoort ligt de waarde vooral bij het kunnen vergelijken van ontwerp-alternatieven. Gebleken is dat het programma DYNASIM hierbij voldoet!

Bij de hoofdafdeling Distributie van Gemeentewaterleidingen Amsterdam, waar juist optimalisatievraagstukken betreffende kwantiteit en kwaliteit aan de orde zijn, is het programma reeds met succes toegepast (lit. 25). Hoewel het is getoetst aan de Amsterdamse situatie, is het rekenprogramma universeel en kan dus worden toegepast op actuele problemen bij andere waterleidingbedrijven.

In de bedrijfstak, zowel nationaal als internationaal, valt op te merken dat er een toename is van het gebruik van (statische) rekenmodellen voor leidingnetberekeningen en dat de behoefte groeit aan verbetering van het inzicht in de kwaliteitsaspecten. Vooral met betrekking tot deze laatste aspecten zijn dynamische rekenmodellen onmisbaar. Zo staat voor het jaar 1990 op het actieprogramma van het KIWA het ontwikkelen van een dynamisch of semi-dyna-

misch rekenmodel, dat gebaseerd is op het, inmiddels door de bedrijfstak erkende, statische rekenprogramma ALEID.

Landelijk zijn ook de ontwikkelingen van het digitaal vastleggen van liggingsgegevens van waterleidingnetwerken in een ver gevorderd stadium. Bij Gemeentewaterleidingen worden daarbij in het "LIS", naast de liggingsgegevens met de daarbij behorende alfa-numerieke kenmerken (zoals, voorzover van belang voor een rekenmodel, coördinaten, kaliber, materiaalsoort en lengte), ook kenmerken vastgelegd als de standen van de afsluiters en spuien. Thans wordt de koppeling ontwikkeld tussen deze geautomatiseerde leidingenregistratie en DYNASIM.

Belangrijke voordelen die hiermee bereikt worden, zijn:

- verbetering van de gebruikersvriendelijkheid (niet meer invoeren van genoemde kenmerken);
- verkorting in voorbereidingstijd van verzamelen van gegevens;
- geautomatiseerde uitvoer van leidingmutaties;
- interactief "inzoomen" naar het gewenste hiërarchisch niveau;
- geografisch georiënteerd uitvoeren van de berekeningsresultaten.

Dit laatste aspect biedt weer de volgende mogelijkheden:

- het voor elk willekeurig gekozen moment (minimum-, maximum- en zovoort): 2-dimensionaal tonen van zogenaamde "iso-contourlijnen", zoals van gelijke drukken, snelheden, reistijden, herkomstpercentages (invloedsgebieden) en dergelijke;
- "3-dimensionaal" tonen van de grootte van de berekende parameters, zoals de snelheden, drukken, verblijftijden en dergelijke, geprojecteerd op de 2-dimensionale weergave (dit kan mogelijk nog uitgebreid worden met de 4e dimensie tijd, door het verloop van de parameters gedurende de gekozen periode als in een "film" weer te geven).

Zoals eerder opgemerkt wordt binnen GW ook het VIS ontwikkeld. Dit geautomatiseerde incassosysteem ten dienste van de notaproductie en invordering van watergelden, heeft ook een aantal nevenfuncties, zoals het selecteren van groot- en kleinzakelijkeverbruiken

per buurt, de buurtverbruiken, het aantal woningen en inwoners per buurt. Koppeling van DYNASIM met het VIS heeft gevolgen voor het verbeteren van de nauwkeurigheid, de actualiteit en ook de gebruikersvriendelijkheid. Vanuit deze koppeling kunnen met het deelprogramma VERBRUIK nauwkeurige afnamegegevens verkregen worden. Zowel de afnameverdeling over een gebied als de variantkeuze kunnen dan exacter benaderd worden. Ook zal het volgen van mutaties en daarmee het onderhouden van de gegevens minder inspanning vereisen. Tevens zijn in dit kader verdere ontwikkelingen van "vraag-voorspellingsmodellen" te noemen.

Parallel aan deze ontwikkeling dient een net van meetpunten opgezet te worden, waarbij op goed geselecteerde lokaties in het leidingnet, naast de huidige drukopnemers, ook andere van belang zijnde kwaliteitsparameters continu of semi-continu gevolgd worden. Bij een dergelijk meetnet zullen de datatransmissie en de gegevensverwerking op moderne leest geschoeid moeten zijn.

Het streefbeeld bij deze ontwikkelingen is een integratie van de informatiesystemen, het (telemetrisch) meetnet en de vraag-voorspellingsmodellen, zodat een effectieve communicatie tussen data-verwerking en het werken met DYNASIM optimaal wordt.

Nadat voorgaande is gerealiseerd, kan de stap naar een volledig automatisch bestuurd distributieproces gezet worden.

Hiervoor zal nog het nodige ontwikkeld moeten worden, zoals de opbouw van regelkringen, een verdere verfijning van vraag-voorspellingsmodellen en het verder verkorten van de rekentijden.

Thans zijn de rekentijden (op de besproken apparatuur) voor deze toepassing nog aan de grote kant. Voor een leidingnet in een gebied zoals Amsterdam-Noord, met circa 150 buizen en 110 knopen, bedraagt de rekentijd (bij een rekenstap van 15 minuten) voor een etmaal circa 5 minuten!

Voor het gehele Amsterdamse distributienet op primair en regionaal niveau (660 buizen met 770 knopen) is de totale rekentijd circa 50 minuten (invoer- en rekenstap zijn hierbij respectievelijk 1 uur en 15 minuten). Ten behoeve van een besturingsmodel voor een der-

gelijk grootschalig leidingsysteem (grote dimensie van de toestandsvector) is vooral een verdere dimensieverkleining noodzakelijk.

Hiervoor is een verdere studie van de toepassing van de rekenregels voor het samenvoegen van parallelle en seriële buizen en/of de decompositietechniek nodig. Het ziet er naar uit dat deze technieken goede mogelijkheden bieden om DYNASIM geschikt te maken voor een dergelijk geautomatiseerd besturingsmodel.

Optimalisatie van een geautomatiseerde distributie kan verkregen worden door het vooraf (bijvoorbeeld in de nacht) invoeren van 24 uur voorspellingen en het vervolgens gedurende deze periode corrigeren van deze voorspelling door actuele metingen van stromingen en drukken op representatieve lokaties in het net.

In de praktijk blijkt reeds (lit.25 en 29) dat de met deze meet-, reken- en besturingsmaatregelen gepaard gaande kosten en inspanningen zeker baten opleveren in het kader van het aanbrengen van veranderingen (pompregiem, netsanering, zonering, enzovoort) en het uitvoeren van preventieve onderhoudsmaatregelen (water- en luchtspoelen, cementeren en dergelijke) ten behoeve van het handhaven en/of verbeteren van de waterkwaliteit en -kwantiteit. Ook zullen de mogelijkheden en de betrouwbaarheid van de voorspellingen verbeterd worden bij het beoordelen van ontwerpvarianten voor netuitbreidingen.

LITERATUUR

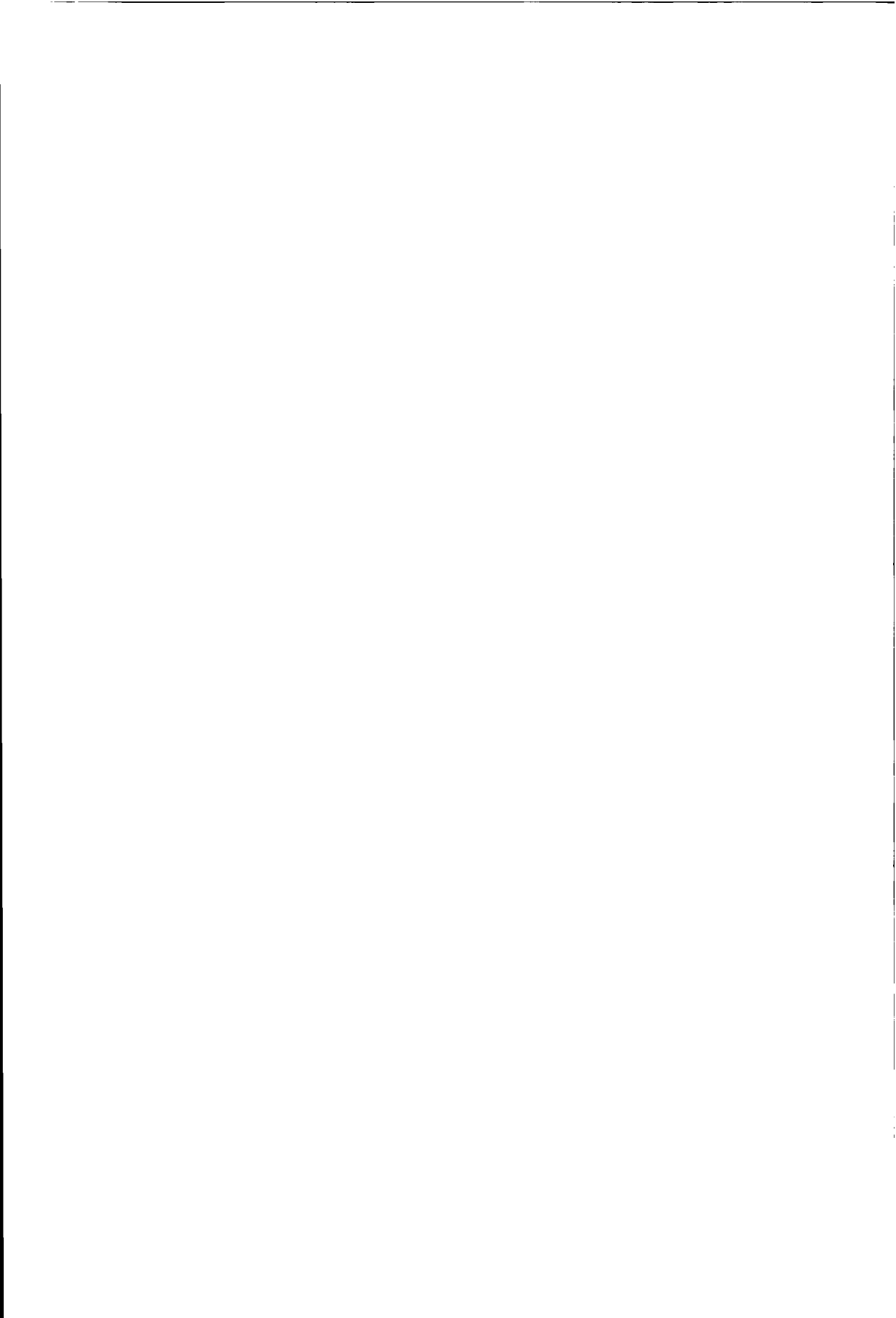
1. Vreeburg, J.H.G. "Nieuwe fase in de ontwikkeling van het KIWA computerprogramma ALEID".
H₂O 22° jaargang 17/89.
2. Elzenga, B. "Oorzaken en bestrijding van roest-
Smeenk, J.G.G.M. problemen in distributiegebieden met
Graveland, A. gietijzeren leidingen".
Cohen, J. KIWA-GW rapportage december 1985.
Schellart, J.A. Onderzoek uitgevoerd te Amsterdam
Visser, P.M. de periode 1980-1984.
3. Konijnberg, W.F. "Statische en dynamische netwerk modellen
Tangena, B.H. voor drinkwatersystemen".
Nooyen, F.J. H₂O 21° jaargang 2/88.
4. Vreeburg, J.H.G. "Projectplan computermodellen voor de
distributie".
KIWA rapportage(concept) t.b.v. de
externe projectbegeleidingsgroep,
mei 1989.
5. Wagner, I. "Der Einfluss von Neutralsalzen auf das
Kuch, A. korrosionsverhalten ungeliegierten
Gerber, S. Eisen-Werkstoffen in gut gepufferten
Trinkwasser".
Werkstoffe und Korrosion 36 (1985)
p.64-69.
6. Sontheimer, H. "The siderite model of the formation of
Kölle, W. corrosion-resistant scales".
Snoeyink, V.C. Journal AWWA- - Research and Technology
november 1981 p 572-579.
7. Hinze, J.O. "Collegedictaat Stromings- en warmte-
overdracht, laboratorium Aëro-Hydrodyna-
mica". 1968. Technische Hogeschool Delft.

8. Walski, T.M. "Analyses of Water Distribution Systems".
Van Nostrand Reinhold Company, 1984.
ISBN 0-442-29192-2.
9. Huisman, L. "Stromingsweerstand in leidingen".
Mededeling nr. 14, februari 1969 KIWA NV.
10. Wensink, H. "Modelstudie drinkwatervoorziening van de
gemeente Amsterdam".
Doctoraal verslag Universiteit Twente
Toegepaste Wiskunde, juni 1984 (uitge-
voerd GW Amsterdam).
11. GrootRoessink, H. "Pompen in DYNA".
Stageverslag Universiteit Twente, Toege-
paste Wiskunde, periode januari-maart
1989. (Uitgevoerd GW Amsterdam).
12. Traas, C.R. "Collegedictaat Splines en de methode der
eindige elementen".
Universiteit Twente, Faculteit Toegepaste
Wiskunde, januari 1983, maart 1984.
13. Windmarsh, A.C.
Painter, J.F. "LSODE Livermore Solvers Ordinary
Differential Equations".
Mathematics and statistics Division.
Lawrence Livermore National Laboratory.
september 1982.
14. Hairer, E.
Wanner, G.
Nørsett, S.P. "Solving Ordinary Differential Equa-
tions I, Non Stiff Problems".
Springer-Verslag computational Mathema-
tics. 1987. ISBN 3-540-17145-2.

15. Cash, J.R. "Stable Recursions with applications to the Numerical Solution of Stiff Systems". Academic Press 1979. ISBN 0-121-63050-1.
16. Jamshidi, M. "Large scale systems": modelling and control North-Holland 1983. Series in System and Engineering Vol. 9. ISBN 0-444-00706-7.
17. GrootRoessink, H. "Geometrische theorie van grootschalige gestructureerde systemen". Doctoraalverslag Universiteit Twente, Faculteit Toegepaste Wiskunde, maart 1990.
18. Singh, M.G. "Dynamical hierarchical control". North Holland Amsterdam, 1980 Revised edition. ISBN 0-444-85488-6
19. Schut, J. "Studies in hiërarchical systems". Memorandum Universiteit Twente, Faculteit Toegepaste Wiskunde, oktober 1990.
20. Doorn, B. van "Identificeerbaarheid en identificatie van buisweerstand in een waterleiding netwerk". Doctoraalverslag Universiteit Twente, Toegepaste Wiskunde, maart 1984 (uitgevoerd GW Amsterdam).
21. Walter, E. "Identifiability of state space models: with applications to transformationsystems". Springer, New York, 1982 ISBN 3-540-11590-0

22. Graupe, D. "Identification of systems".
Krieger Pub. Co. Huntington NY. 1972.
ISBN 0-882-75359-2.
23. Essen, M. van "SCHAT, een methodiek voor het schatten van parameters op weerstandsfactoren in een netwerk".
Afstudeerverslag Algemene Hogeschool Amsterdam, Technische Maritieme Faculteit, afdeling Operationele Techniek, mei 1990 (uitgevoerd GW Amsterdam).
24. Drift, C. van de "Kwaliteitsvoorspellingen van drinkwater in een leidingnet met behulp van een dynamisch reistijden model".
Doctoraalstudie Technische Universiteit Delft, Vakgroep Gezondheidstechniek en Waterbeheersing, Faculteit Civiele Techniek, september 1989 (uitgevoerd GW Amsterdam).
25. Cohen, J. "Diverse toepassingen van het dynamisch rekenmodel DYNASIM".
Intern GW rapport, sector Ontwikkeling Distributie, september 1990.
26. Cohen, J. "Ontwikkeling van een dynamisch rekenmodel voor de distributie van drinkwater".
H₂O 22^a jaargang 12/89.
27. Cohen, J.
Drift, C. van de "Verdere ontwikkeling van het dynamisch reken- en simulatiemodel voor de distributie".
H₂O 22^e jaargang 26/89.

28. Cohen, J. "The development of a dynamic calculation model for drinking water networks".
Aqua Vol.39, No.3, juni 1990.
29. Cohen, J. "Toepassingen van het dynamisch reken- en simulatiemodel DYNASIM".
deel 1, H₂O 23^e jaargang 12/90
deel 2, H₂O 23^e jaargang 13/90 .



BIJLAGE 1

BIJLAGE 1 AFKORTINGEN

1. Algemeen
 2. Parameters waterkwaliteit
 3. Schematisch overzicht van uit literatuur bekende programma's
- Voor verklaring zie ook bijlage 3, DEFINITIES / BEGRIPPEN.

1. ALGEMEEN

GW	Gemeentewaterleidingen Amsterdam
VEWIN	Vereniging van Exploitanten van Waterleidingbedrijven In Nederland
KIWA	Keuringsinstituut voor Waterleidingartikelen
RD	Rivier-Duinwater
RP	Rivier-Plassenwater
DYNASIM	DYNAMisch SIMulatie programma
DYNA	DYNAMisch basis hoofdprogramma
QUALI	QUALiteits (facultatief) hoofdprogramma
REISMEE	hulpprogramma van QUALI
REISTEGEN	" "
SCHAT	SCHATten (facultatief) hulpprogramma
GRAPH	GRAPHisch (facultatief) hulpprogramma
ALEID	ALgemeen LEIDingnet rekenprogramma
WANACA	WATER Network Analysis CALCulation (Dit zijn statische programma's)
WATNET	WATERNetwork
WSSM	Water Supply Simulation Model
DWANACA	Dynamical WATER Network Analysis CALCulation (Dit zijn semi-dynamische programma's)
KWAST	KWAliteit STad (Kwaliteitsonderzoek uitgevoerd door Gemeentewaterleidingen en KIWA)
LIS	Leidingen Informatie Systeem
VIS	Verbruikers Informatie Systeem
DIS	Distributie Informatie Systeem
BDF	Backward Differentiation Formulas (Numerieke differentiatie methode)

2.	PARAMETERS WATERKWALITEIT
TOC	Total Organic Carbon (totaal organische koolstof)
DOC	Dissolved Organic Carbon (opgelost organische koolstof)
AOX	Adsorbable Organic Halogenes (somparameter van de aan actieve kool adsorbeerbare organo-halogene verbindingen, voornamelijk Cl en Br)
AOC	Assimilable Organic Carbon (assimileerbare deel van de organische koolstof)
SI	Saturatie Index (verzadigingsindex)
EGV	Elektrisch Geleidings Vermogen
Cl	Chloride (ion)
Fe	Ijzer (ion)
O ₂	Zuurstof
SO ₄	Sulfaat (ion)
HCO ₃	Waterstofcarbonaat (ion)
FTU	Formazine Turbidity Unit (de eenheid voor troebelingsgraad, troebelheid)
pH	negatieve logaritmie van de waterstofionenconcentratie- (zuurgraad)

Programma's	Druk in knoop	Volumestroom of snelheid	Reis- en verblijftijd	Stromings-trajecten	Herkomst	Parameter-waardeverloop	Samenvoeging van buisen	Opmerkingen
<u>Statisch</u>								
ALEID (1)	X X	X X	O	O	O	O	O	<ul style="list-style-type: none"> . Momente berekening. . Basis vergelijking voor de buisweerstand: $AP = \lambda \frac{8L Q^2}{\pi^2 g D^5}$. Deze wordt gelineariseerd tot $Q = \text{APK}$. De oplossing verloopt iteratief via vereffening van volumestromen in buisen of drukken in knopen. . verwerking op PC.
<u>Semi-dynamisch</u>								
DWAMACA (2)	X X	X X	X	O	X	O	O	<ul style="list-style-type: none"> . Als basis een statisch rekenprogramma. . Toegevoegd is een invoerverschil dat nieuwe invoergegevens creëert voor berekeningen op opvolgende tijdstippen met gebruikmaking van eerder gemaakte berekeningen. . Verwerking op PC.
<u>Dynamisch</u>								
DYNAMIS	X X X	X X X	X X	X X	X X	X X	X X	<ul style="list-style-type: none"> . Uitgegaan wordt van tijdsafhankelijke continue vergelijking. . De oplossing verloopt via een matrix DV, een toestandsvector (waarin stromingen en drukken in buisfers) wordt bepaald, en vervolgens de drukken in knopen. Hiermee kunnen overige kwaliteitsparameters worden gemodelleerd. Weliswaar verloopt de oplossing numeriek, echter is de rekentijdstapgrootte onbeperkt klein te kiezen. . Effect van de impulssterm komt tot uiting. . Simulaties zijn mogelijk incl. sterk fluctuerende afnamen. . Verwerking op micro-VAX.
<u>Bron</u>								
<ol style="list-style-type: none"> 1. KIMA 2. Ingenieursbureau DHV 3. Waterloophundilaboratorium 4. Gemeentediens Riolerings Waterverversing (A'dam) 5. Water Research Centre (UK) 6. Water Engineering Research Laboratory (US Environmental Protection Agency) 								

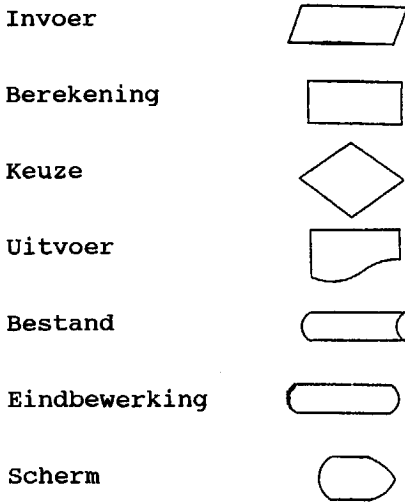
X X X zeer goed mogelijk
 X X goed mogelijk
 X zeer beperkt mogelijk (vaak handmatige volgberekening)
 O niet mogelijk

BIJLAGE 2

		<u>EENHEID</u>
x	Lengte coördinaat	(m)
L	Lengte buis	(m)
θ	Hoek coördinaat	(-)
r	Radiaal coördinaat of	(m)
	Functiewaarde of	(-)
	Restwaarde	(-)
A	Oppervlakte buis of	(m ²)
	Oppervlakte watertoren of	(m ²)
	Aankomstfractie in knoop	(%)
D	Middellijn	(m)
R	Straal	(m)
t	Tijd	(s)
T	Reis- en verblijftijd	(s)
H	Hoogte	(m)
h	Intervalgrootte of	(-)
	Tijdstapgrootte	(s)
u	Snelheid (plaatselijk)	(m/s)
V	Snelheid (gemiddeld) of	(m/s)
	Volume	(m ³)
P	Druk	(Pa, mwk)
Pw	Watertoren en/of reservoirdruk	(Pa, mwk)
Po	Voordruk	(Pa, mwk)
g	Zwaartekrachtversnelling of	(m/s ²)
ρ	Soortelijke massa	(kg/m ³)
η	Dynamische viscositeit	(kg/ms)
ν	Kinematische viscositeit	(m ² /s)
τ	Schuifspanning	(Pa)
τ_0	Wandschuifspanning	(Pa)
ψ	Volumestroom	(m ³ /s)
λ	Weerstandscoefficiënt	(-)
ζ	Weerstandsfactor vertragingverlies	(-)
k	Wandruwheid	(m)
Rw	Weerstandsterm wandwrijving	(kg/m ²)
Rt	Totale weerstand	(kg/m ²)
K	Evenredigheidsfactor	(kg/m ²)
I	Inertantieterm (impulsterm)	(kg/m ⁴)

		<u>EENHEID</u>
Re	Reynoldsgetal	(-)
C	Capaciteit watertoren of Correctiefactor of Spline-coëfficiënt	(m ⁴ s ² /kg) (-) (-)
G	Pompkarakteristiek $\left(\frac{\varphi}{\Delta P}\right)$	(m ⁴ s/kg)
Q	Verbruik	(m ³ /s)
f	Verhoudingsgetal of Fractiegrootte	(-) (%)
CFV	Cumulatieve Frequentie Verdeling	(%)
S(x)	Benaderingsfunctie	
B _i	Basisfunctie t.b.v. opbouw splinefunctie	
\bar{R}	Restvector	
\bar{X}	Toestandsvector	
\bar{Y}	Weerstandsvector	
\bar{J}	Aanjaagvector	
\bar{B}	Instroomvector	
\bar{C}	Afnamevector	
\bar{F}	Watertorendrukvector	
\bar{Z}	Parametervector (uit verzameling parametervectoren Z)	
z	De te identifieren elementen van \bar{Z}	
\hat{z}	De geschatte waarde	
$\bar{U}(t)$	Ingangssignaal (uit verzameling ingangsvectoren U)	
$\bar{B}(t)$	Uitgangssignaal	
v(z)	De omgeving van z	
A, a	Matrices	
G, g	Matrices	
H, D	Matrices	
E, R	Matrices	
W	Weegfactor	
B	Berekende waarde	
M	Meetwaarde	
n, m	Aantal	
n _{kno}	Aantal knopen	
n _{wa}	Aantal watertorens (buffers)	
n _{bu1}	Aantal buizen	
n _{ma}	Aantal mazen	

i, j, t Lopende variabelen
 v (index) voor vervangend
 \mathbb{R}^+ Verzameling positieve reële getallen
 \forall Voor alle elementen
 \in Behorend tot de verzameling
 \wedge Conjunctie (en)
 \subset Inclusie (deelverzameling)



BIJLAGE 3

Onderstaand worden omschrijvingen gegeven van in de tekst gebruikte definities en begrippen.

1. Rekenmodellen,
2. Waterleidingtechnische aspecten,
3. Hiërarchie distributienet,
4. Distributiemiddelen,
5. Schematisatie leidingnetten,
6. Watersoorten en -kwaliteit,
7. Kwaliteitsbepalende aspecten,
8. Hydraulische aspecten,
9. Rekenkundige aspecten.

1. ALGEMEEN

REKENMODELLEN

STATISCH REKENMODEL: rekenmethode voor het vaststellen van de momentane (stationaire) situatie in een watertransport- en distributieleidingsysteem.

Het is een rekenmethode waarmee, voor één bepaald gekozen tijdstip, veelal met behulp van één gelineariseerde vergelijking, uit de invoergegevens, de voor dat tijdstip geldende uitvoergegevens (snelheid, richting en druk) worden bepaald.

Deze methode wordt vooral gebruikt voor (kwantiteits) ontwerp en controleberekeningen.

DYNAMISCH REKEN- EN SIMULATIEMODEL: rekenmethode voor de simulering van het tijdsvariabel functioneren van een watertransport- en distributieleidingsysteem, inclusief de daarvoor benodigde technische middelen.

Het is een mathematische rekenmethode waarmee, met behulp van verscheidene tijdsafhankelijke continue vergelijkingen, berekeningen in variabele tijdstappen worden uitgevoerd over een te kiezen tijdsperiode.

Deze methode is niet alleen geschikt voor het uitvoeren van kwantitatieve ontwerp- en controleberekeningen, maar ook voor het uitvoeren van waterkwaliteitsberekeningen. De methode geeft een in-

zicht in het functioneren van de transport- of distributiemiddelen en is een basis voor de (geautomatiseerde) besturing daarvan.

INFORMATIESYSTEMEN

LEIDINGEN INFORMATIESYSTEEM: (LIS) een technisch bedrijfsmiddel voor de registratie van en informatie over de ligging en samenstelling van alle leidingen.

VERBRUIKERS INFORMATIESYSTEEM: (VIS) een technisch bedrijfsmiddel voor de registratie van en informatie over de op het distributienet aangesloten afnemers (en hun installaties).

DISTRIBUTIE INFORMATIESYSTEEM: (DIS) een technisch bedrijfsmiddel voor de registratie van en informatie over het functioneren van de distributie (inclusief het LIS, het VIS en de rekenprogramma's).

2. WATERLEIDINGTECHNISCHE ASPECTEN

DISTRIBUTIE: een samenhangend functionerend geheel van distributiemiddelen, die de verdeling van het drinkwater mogelijk maken; het omvat het DISTRIBUTIELEIDINGNET (inclusief de reservoirs, watertorens, aansluitingen naar de afnemers en de brandbestrijdingsvoorzieningen) met de daarop aangesloten pompstations.

VOORZIENINGSGBIED: het gebied waarbinnen drinkwater, door een waterleidingbedrijf bereid, wordt verbruikt; het water wordt door het waterleidingbedrijf en/of derden onder distributiedruk gebracht en aan de afnemers geleverd.

VERZORGINGSGBIED: het deel van het voorzieningsgebied waarbinnen het drinkwater door een waterleidingbedrijf onder distributiedruk wordt gebracht en deels door het waterleidingbedrijf en/of derden aan de afnemers geleverd.

DISTRIBUTIEGBIED: het deel van het verzorgingsgebied waarbinnen drinkwater onder distributiedruk wordt geleverd door het waterleidingbedrijf aan de afnemers.

ENGROS LEVERING: levering door een waterleidingbedrijf aan een ander waterleiding-distributie-bedrijf, onder distributiedruk aan zijn distributiegebied, of onder transportdruk in zijn reinwaterkelders.

LEVERING: de levering, respectievelijk de ter beschikking stelling van drinkwater.

3. HIERARCHISCH DISTRIBUTIENET

DISTRIBUTIE(LEIDING)NET: net van leidingen ten behoeve van de distributie van water onder distributiedruk vanaf de pompstations aan de afnemers, het is verdeeld in een **HIERARCHISCH STELSEL** van niveaus:

- **PRIMAIR NIVEAU:** net van hoofdleidingen dat de distributiepompstations en de regionale netten met elkaar verbindt en zo het gehele distributiegebied omvat. Dit vormt het eerste en hoogste niveau in het **HIERARCHISCH STELSEL**.
- **REGIONAAL NIVEAU:** hoofdleidingnetten die regionaal aangesloten zijn op het primaire hoofdleidingnet en waarop distributieleidingen zijn aangesloten. Zij vormen het tweede niveau in het **HIERARCHISCH STELSEL**.
- **LEVERINGSNIVEAU:** leidingen voor de verdeling van het water in het distributiegebied. Zij vormen stelsels van leidingen op buurt- en wijkniveau, worden gevoed vanuit de (regionale) hoofdleidingstelsels en vormen met de **AANSLUITINGEN** het derde niveau in het **HIERARCHISCH STELSEL**.

4. DISTRIBUTIEMIDDELEN

(DISTRIBUTIE-)POMPSTATIONS: pompstations al of niet voorzien van (rein-)waterreservoirs voor de levering van water onder distributiedruk in een verzorgings- of distributiegebied, zij vormen met de primaire hoofdleidingen het eerste niveau in het **HIERARCHISCH STELSEL**.

LEIDING: Aaneenschakeling van buizen met dezelfde kenmerken (middellijn en wandruwheid).

AFSLUITER: Technisch middel ter regeling van de waterstroom en/of de druk in een buis.

BUFFER: Een technisch middel (watertoren, reservoir), dat dient voor opvang van water bij verschil tussen invoer en afname.

DRUKBEVEILIGINGSINSTALLATIE: distributiemiddel ter beperking van ongewenste drukschommelingen (waterslag) in een leidingnet.

AANSLUITING: de leiding van het bedrijf waarmee de drinkwaterinstallatie is aangesloten op de hoofdleiding, met inbegrip van de meetinrichting en alle andere door of vanwege het bedrijf in of aan die leiding aangebrachte apparatuur, zoals keerkleppen, hoofdkranen, begrenzers.

HOOFDLEIDING: de leiding van het bedrijf waarop aansluitingen tot stand kunnen worden gebracht.

5. SCHEMATISATIE LEIDINGNETTEN

SCHEMATISATIE: Voorstelling van het beschouwde leidingnet door buizen en knopen.

GEOMETRIE/NETCONFIGURATIE: De opbouw van een leidingnet (afmetingen en mate van vermaasdheid).

KNOOPPUNT: Fictief punt van samenkomst in een leidingnet tussen leidingen, van leidingen met reservoirs, watertorens en dergelijke en (in een distributieleiding) tussen leidingen en de aansluitingen.

INSTROOMKNOOP: Knooppunt waarin een instroom in het beschouwde net is gesitueerd.

AFNAMEKNOOP: Knooppunt waarin een afname is gesitueerd.

AANKOMSTKNOOP: De afnameknoop die in REISTEGEN wordt ingevoerd en waarvoor de herkomst(en) en de troebeling worden bepaald van het beschouwde water.

6. WATERSOORTEN- EN KWALITEIT

WATERSOORTEN

RUW WATER: ongezuiverd water direct uit de winmiddelen.

VOORGEZUIVERD WATER: water dat een geringe (voor)zuivering heeft ondergaan ten behoeve van het transport naar de (na)zuiveringsbedrijven en ten behoeve van de levering aan de industrie.

DRINK- REIN WATER: water dat voldoet aan de wettelijke eisen voor consumptie.

WATERKWALITEIT

(zie ook bijlage 1, AFKORTINGEN)

TROEBELING: De troebelheid van een suspensie wordt gedefinieerd als het quotiënt van de totale hoeveelheid strooilicht en de hoeveelheid licht van de belichtende straal. Als zodanig is dit de kwaliteitsparameter (in FTU) die het aantal onopgeloste (zwevende) deeltjes aangeeft dat zich in het drinkwater bevindt. Deze parameter is een maat voor het aantal Fe-deeltjes dat gedurende de reistijd van het water door het net van de buiswand aan het water is afgegeven.

SCALING: De in de loop der tijd ten gevolge van afzettingen, ontstane harde sluitlaag van de totale aangroei op de buiswand; in het algemeen bestaande uit ijzer- en carbonaatverbindingen.

SEDIMENT: Afzetting van vooral anorganische stoffen in de leidingen.

DETRITUS: Verzamelnaam voor een conglomeraat van geprecipiteerde organische- en anorganische stoffen (zoals restprodukten uit de zuivering, afbraak- en afstervingsprodukten van het biologisch leven en chemische omzettingsprodukten ten gevolge van processen die zich in het net afspelen).

ACTINOMYCETEN: Organismen die tot de bacteriën behoren, lijken morfologisch op schimmels. Zij beïnvloeden de organoleptische waarneembaarheid door de zeer lage smaakdrempel.

ORGANOLEPTISCH WAARNEEMBARE KWALITEITSASPECTEN: Door middel van de menselijke organen waarneembare aspecten, zoals smaak, reuk en zicht.

AEROMONAS: Opportunistisch-pathogene (voor verzwakte mensen schadelijke) bacterie.

E.COLI: Indicator organisme voor vaststelling van feacale verontreiniging.

EUTROOF: Bemesting van water die aanleiding kan geven tot buitensporige algengroei.

ANAEROOB: Situatie waarbij sprake is van zuurstofloosheid.

KOLONIEGETAL: Het totaal aantal kolonievormende bacteriën bij de toegepaste, genormaliseerde bepalingmethode.

NAGROEI: De toename van bacteriën en hogere organismen tijdens de distributie.

7. KWALITEITSBEPALENDE ASPECTEN

FRACTIE: Het percentage water van de instroom (REISMEE) of van de afname (REISTEGEN) dat met de bijbehorende reistijd een traject door een leidingnet aflegt.

HERKOMST: De oorsprong van het water dat op een aankomstknop arriveert. De oorsprong zal zijn de plaats waar dat water het leidingnet is ingestroomd.

INSTROOM: Hoeveelheid water per tijdseenheid, intredend in een leidingnet op een instroomknop.

INSTROOMTIJDSTIP: Het tijdstip waarop de berekening met REISMEE wordt gestart.

AANKOMSTTIJDSTIP: Het tijdstip waarop een waterdeeltje in een aankomstknop arriveert of starttijdstip voor REISTEGEN.

TRAJECT: De door een waterdeeltje doorlopen weg in de verzameling buizen en buffers vanaf een instroomknop tot een afnameknop.

VERBLIJFTIJD: De tijd die een waterdeeltje in een leiding of in een watertoren/reservoir doorbrengt.

REISTIJD: De som van de verblijftijden van een waterdeeltje in een traject.

AFNAME: Hoeveelheid water per tijdseenheid uit het leidingnet tredend bij een afnameknop.

INVLOEDSGEBIED: Het deel van het distributiegebied waaraan drinkwater wordt geleverd door een pompstation of vanuit een bepaalde hoofdleiding of invoerknop.

WATERSCHEIDING: Grens tussen verschillende invloedsgebieden.

PENDELZONE: Het gebied waar water veelvuldig van richting verandert.

STAGNATIEZONE: Het gebied dat gekenmerkt wordt door in richting wisselende (zeer lage) stroomsnelheden.

8.

HYDRAULISCHE ASPECTEN

VERTRAGINGSVERLIES: Het energieverlies dat bij stromend water optreedt en tot drukverlies leidt. Dit ten gevolge van appendages (afsluiters, bochten en dergelijke).

WRIJVINGSVERLIES: Het energieverlies dat bij stromend water optreedt en tot drukverlies leidt. Dit ten gevolge van de buisweerstand.

INERTANTIE: Evenredigheidsterm die een maat is voor de buffering van impuls.

DISTRIBUTIEDRUK: De minimum druk waaronder het drinkwater op een bepaald punt in een distributiegebied moet worden geleverd; voor Gemeentewaterleidingen is dit 0,25 MPa (25 mwk).

TRANSPORTDRUK: De momentane druk, noodzakelijk om de gewenste hoeveelheid water door een transportleidingnet binnen de gewenste tijd te verpompen.

PROPSTROMING: Een fictieve stroming in een leiding. Er wordt aangenomen dat er geen menging (dispersie) in de stroomrichting optreedt.

WATERSLAG: Het plotseling optreden van zeer kortstondige drukveranderingen in gesloten leidingen, veroorzaakt door abrupte snelheidsveranderingen in de volumestroom. (De voortplantingssnelheid van de drukgolf is sterk afhankelijk van het buismateriaal en varieert van 500 m/s voor PVC tot 1500 m/s voor staal).

TIJDCONSTANTE: Een grootheid die aangeeft hoe snel procesveranderingen zich in de tijd voltrekken.

9. REKENKUNDIGE ASPECTEN

REKENSTAP: De in het numerieke rekenproces, over de reken- of simulatieperiode, gebruikte tijdstap voor de bepaling van de oplossing van de toestandsvector.

TOESTANDSVECTOR: De vector bestaande uit onafhankelijke toestandsvariabelen (buisstromen en bufferdrukken).

REKENTIJD: De totale, door de computer benodigde, tijdsduur voor het doorrekenen van een gekozen reken- of simulatieperiode.

INVOER- EN UITVOERSTAPPEN: Van de hiërarchie afhankelijke tijdstappen waarin de reken- of simulatieperiode is verdeeld ten behoeve van respectievelijk de invoergegevens (instromen, afnamen, drukken) en de gewenste uitvoergegevens.

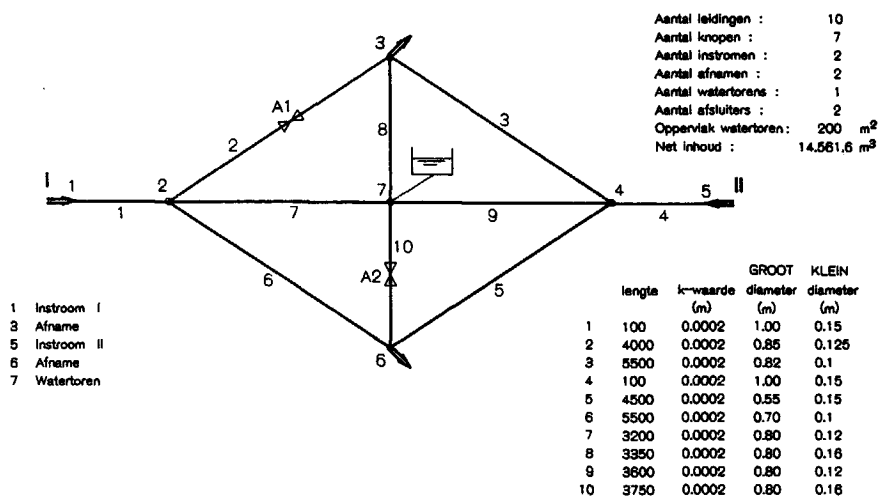
AFBREEKCRITERIUM: Een criterium dat in DYNA, SCHAT, REISMEE en REISTEGEN wordt ingevoerd ten einde de rekentijd binnen aanvaardbare grenzen te houden.

DECOMPOSITIE: Het nagaan of en hoe een systeem beschreven kan worden door onderling verbonden subsystemen.

INTERCONNECTIESYSTEEM: Systeem bestaande uit onderling verbonden subsystemen.

BIJLAGE 4

TESTNET H₂O algemene gegevens



a

H₂O-GROOT

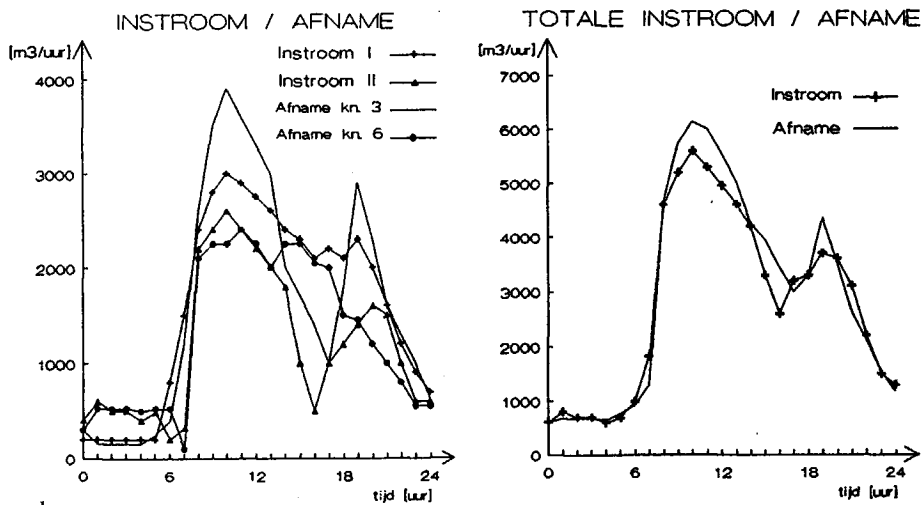
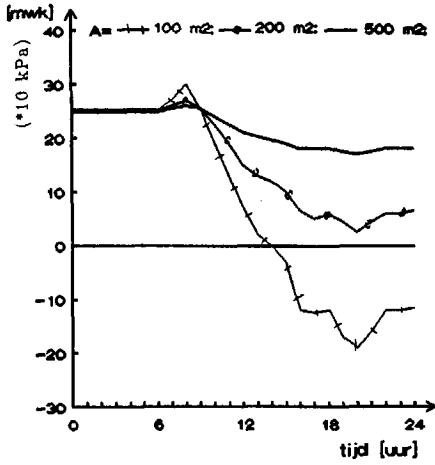


fig. 1 Uitgangssituatie.

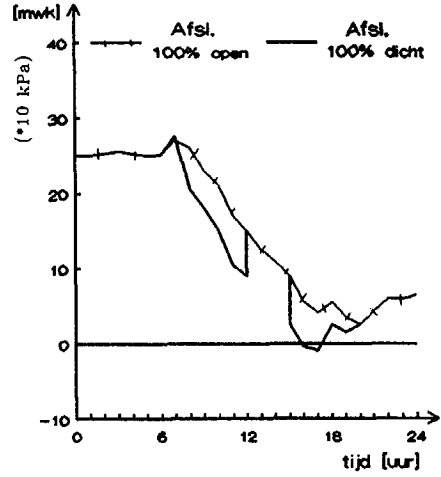
H₂O-GROOT

DRUK IN KNOOP 3 AFHANKELIJK VAN WATERTORENOPPERVLAK A



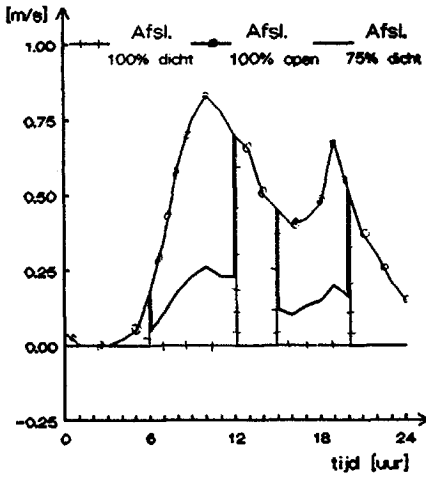
a

DRUK IN KNOOP 6



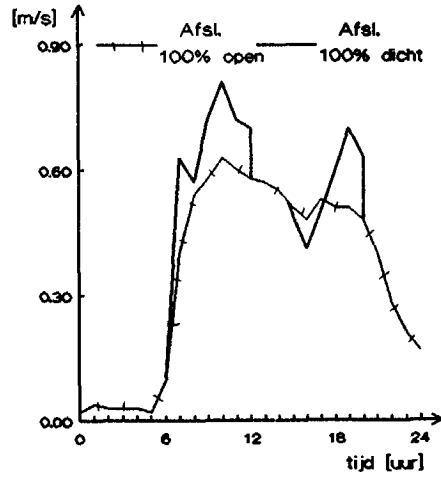
b

SNELHEID IN BUIS 2



c

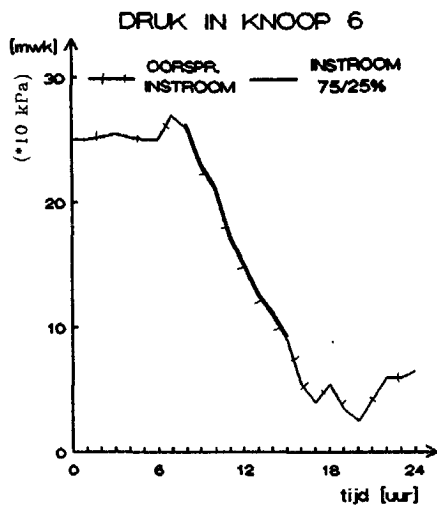
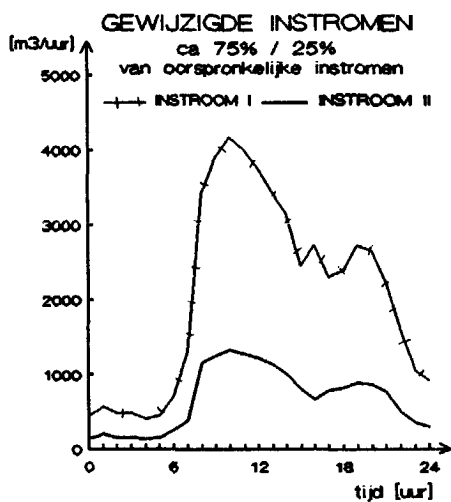
SNELHEID IN BUIS 7



d

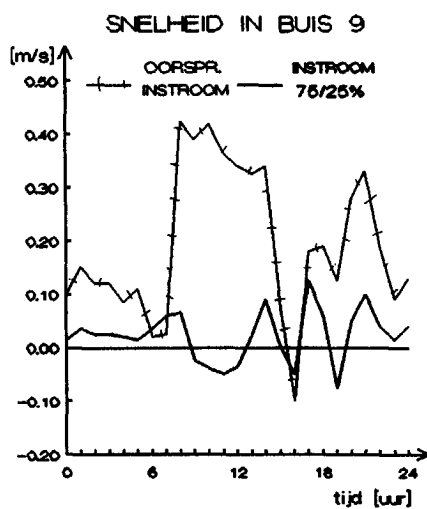
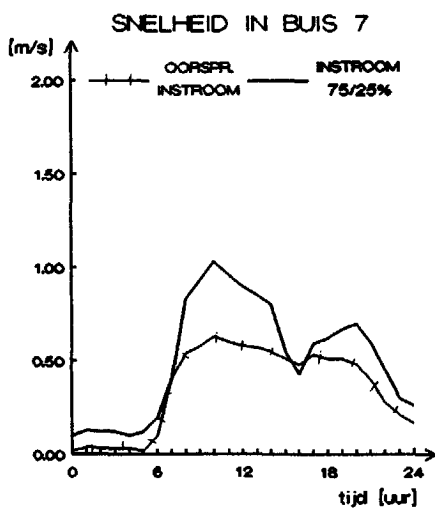
fig. 2 Watertoren- en afsluitervariaties.

H₂O-GROOT



a

b



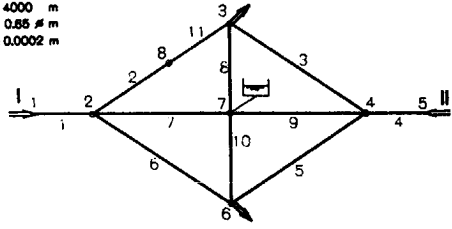
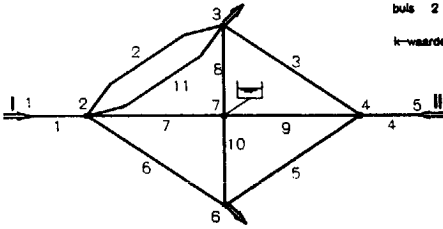
c

d

fig. 3 Instroomvariatiës.

H₂O-GROOT
samenvoegen buizen

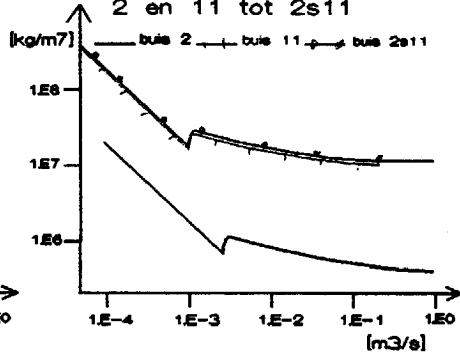
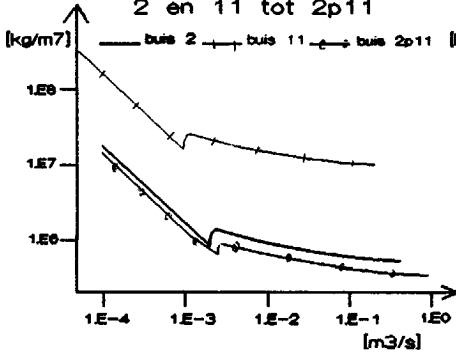
buis 11 L = 6000 m
D = 0.40 m
buis 2 L = 4000 m
D = 0.85 m
k-waarde = 0.0002 m



PARALLEL

SERIE

DE VERVANGENDE WEERSTANDSWAARDE
vervanging van buis 2 en 11 tot 2p11



STROMINGSEQUIVALENTIE
IN BUIS 8 BIJ SERIE VERVANGING

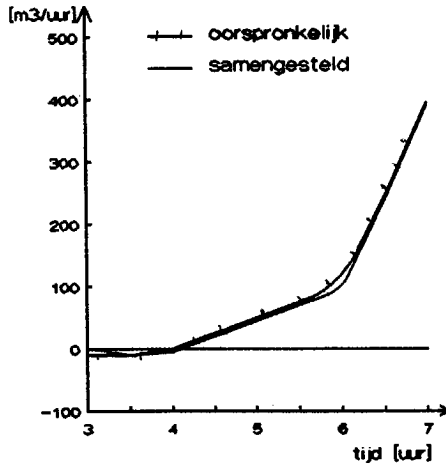


fig. 5 Samenvoegingsaspecten.

H₂O-GROOT leksimulatie in buis 5

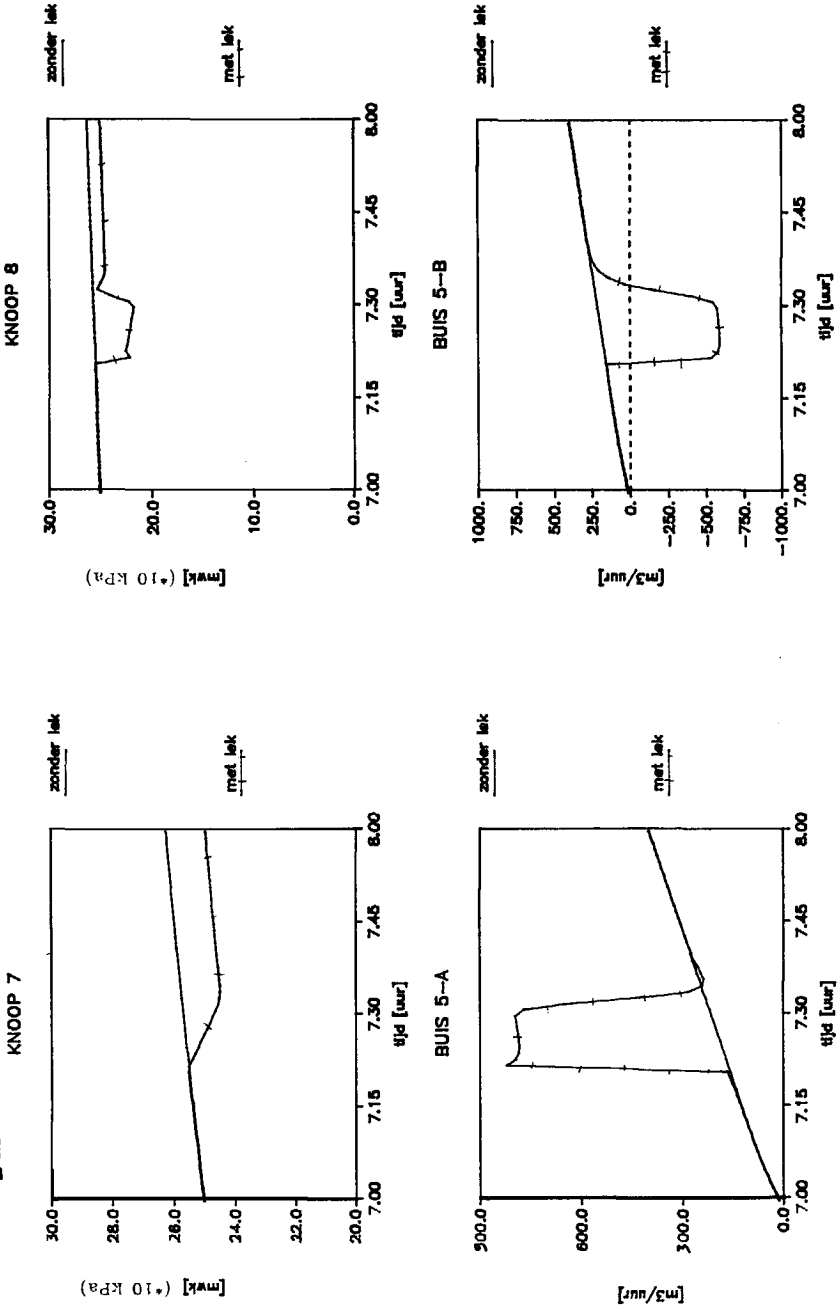
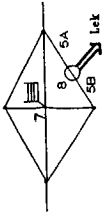


fig. 6 Gevolgen voor de knopen 7(watertoren) en 8 door lek in buis 5.

H₂O-GROOT werking SCHAT

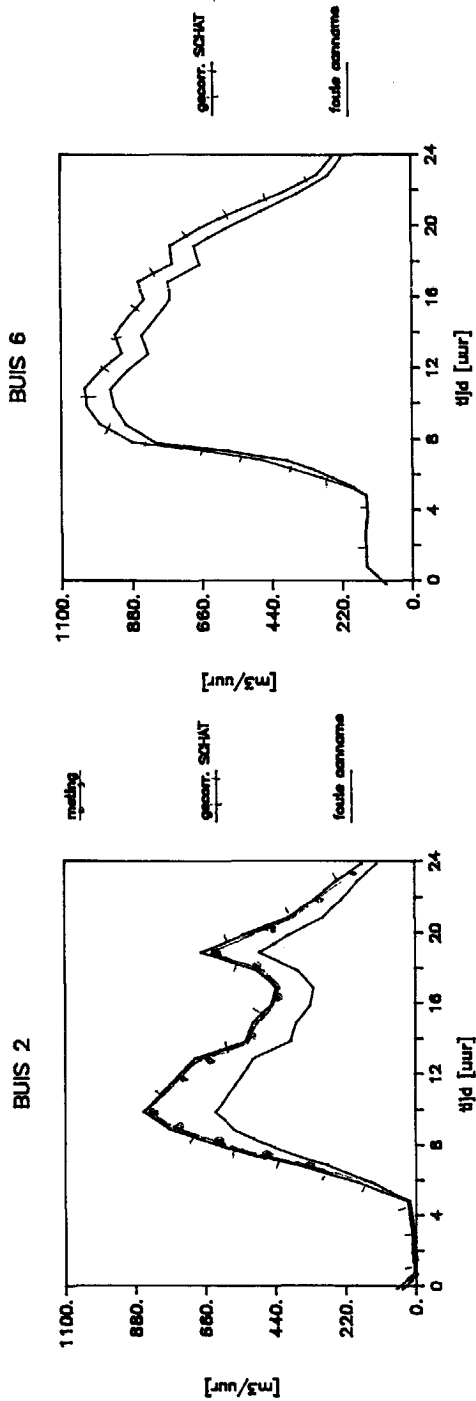
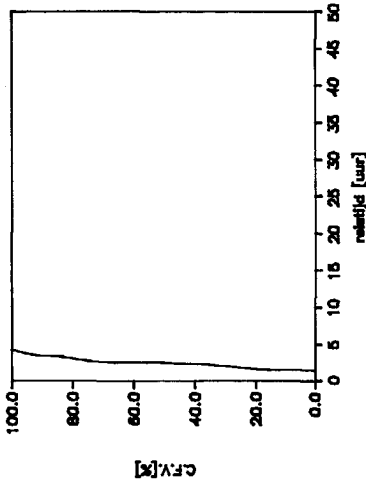


fig. 7 Corrigeren in buis 2 en het gevolg voor buis 6.

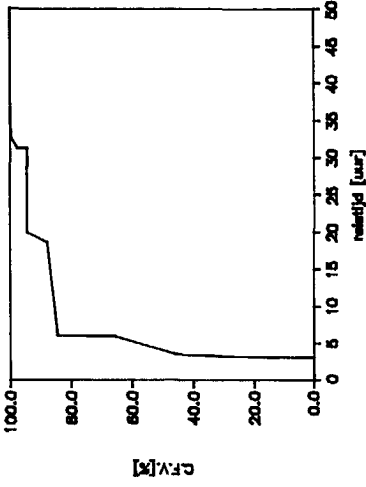
H₂-GROOT

invoerstep 1 uur, gehele net

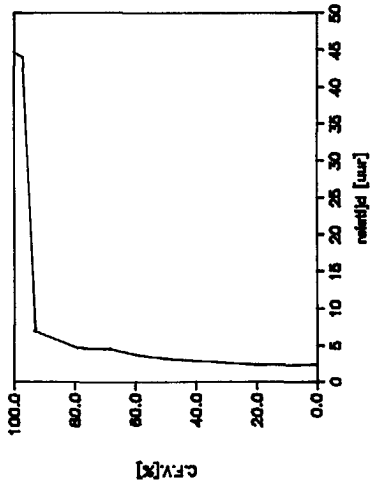
8 UUR



14 UUR



16 UUR



21 UUR

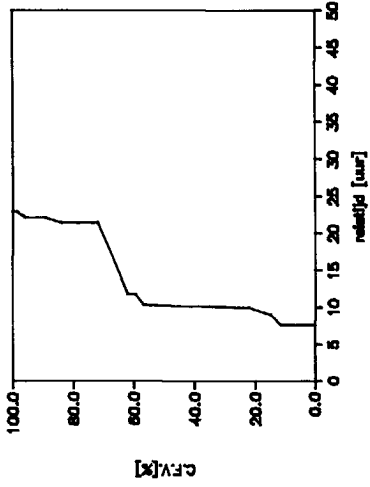


fig. 8 Verbliftijdsberekningen voor gehele net.

H₂O-GROOT

invoerstep 1 uur, knoop 3

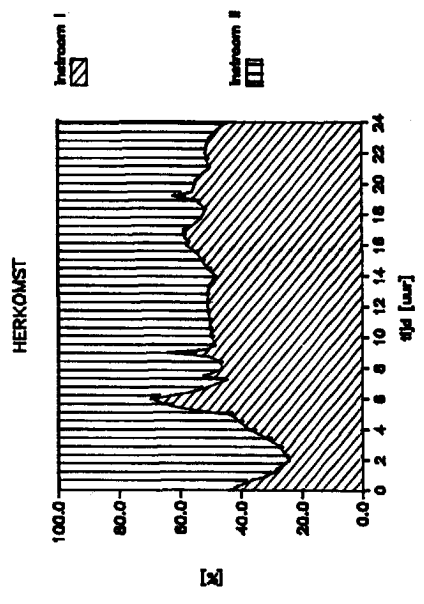
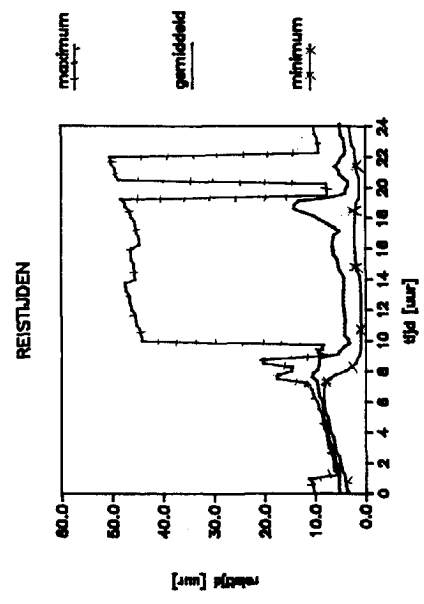
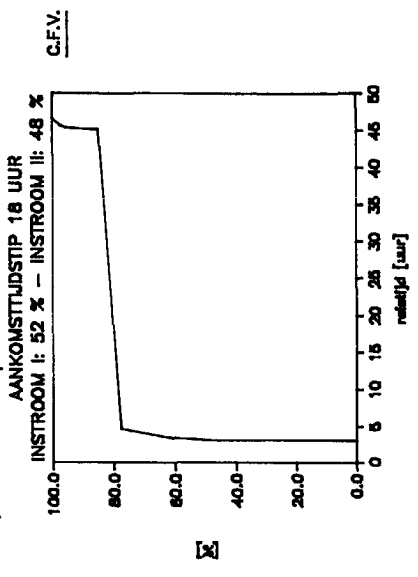
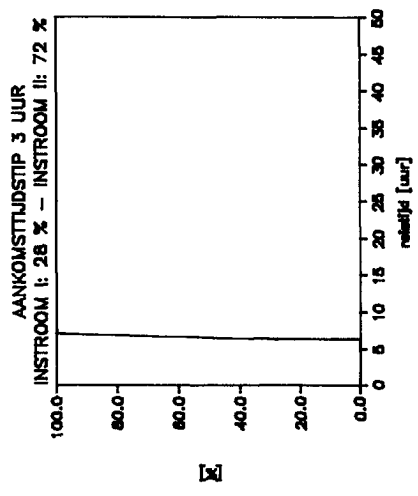


fig. 9 Kwaliteitsaspecten voor knoop 3.

H₂O-GROOT
invoerstep 1 uur, knoop 3 en 6

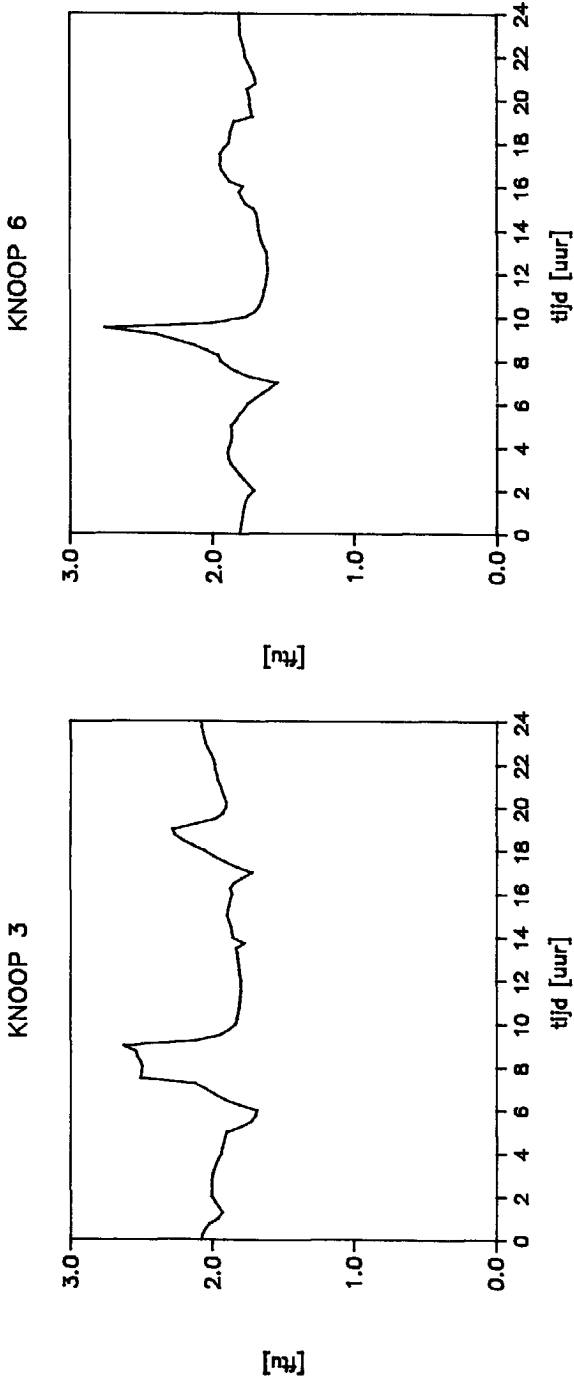
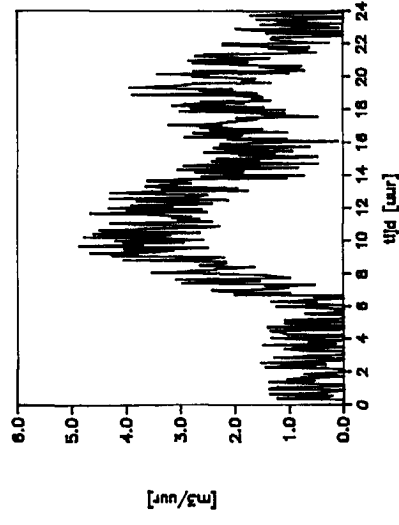


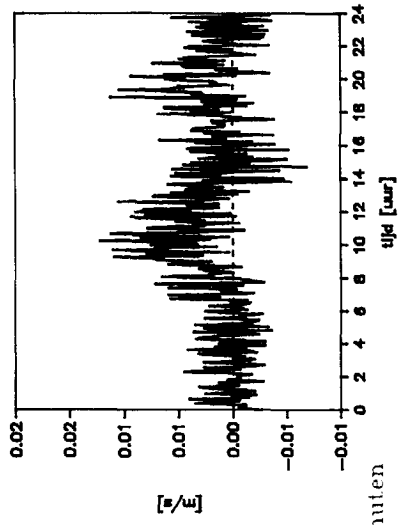
fig. 11 Troebelingsberekeningen voor knopen 3 en 6.

H₂-KLEIN

AFNAME KNOOP 3

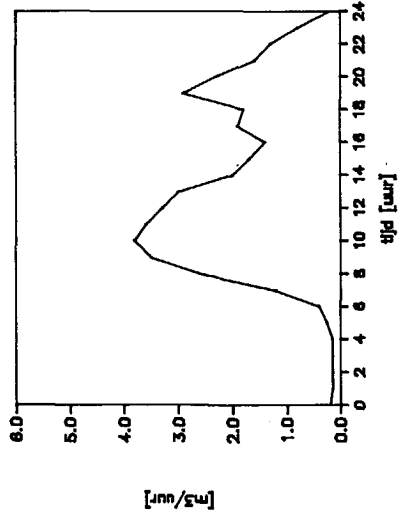


SNELHEID BUIS 3

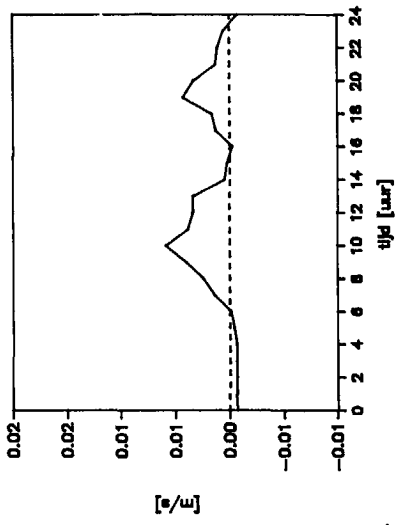


tijdstap 5 minuten

afname knoop 3



snelheid buis 3



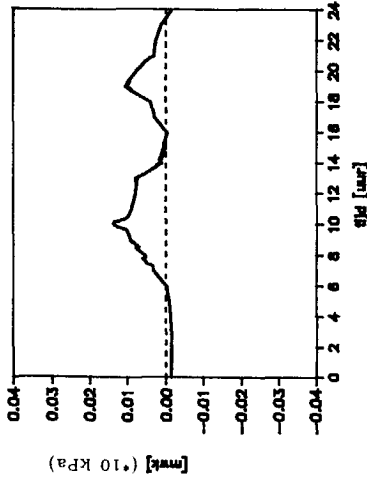
tijdstap 1 uur

fig. 12 Effect op de snelheid t.g.v. de ruis op de afname.

H₂-KLEIN

invoerstep 1 uur, buis 3

DRIJKVAL TEN GEVOLGE VAN WANDRWIJVING



DRIJKVAL TEN GEVOLGE VAN IMPULSVERLIES

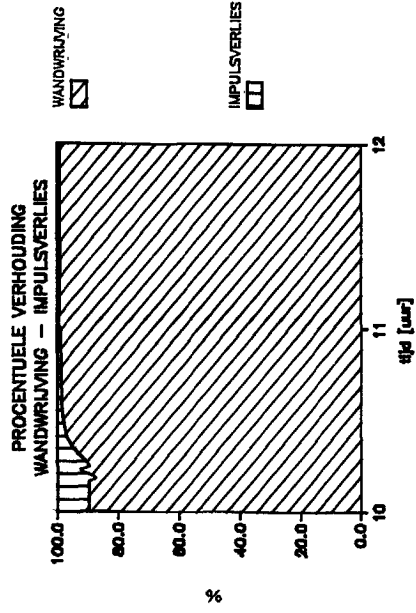
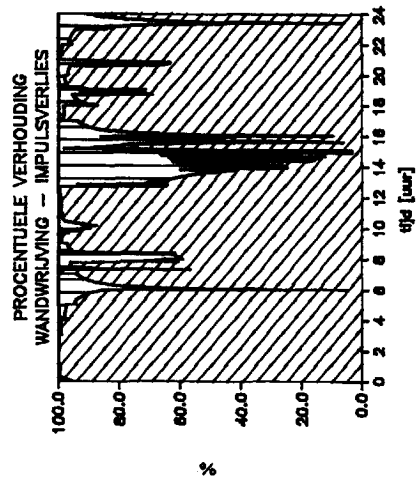
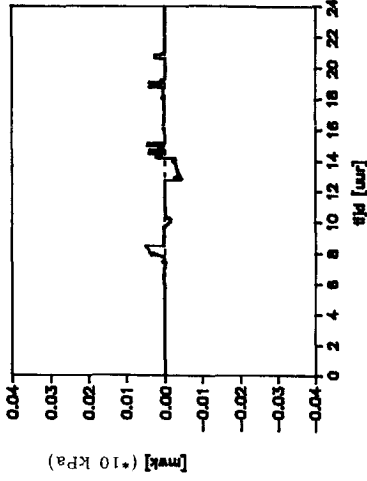


fig. 13 Effecten wandwrijving, resp. impulsverlies op de drukval.

HO-KLEIN invoerstep 5 minuten, buis 3

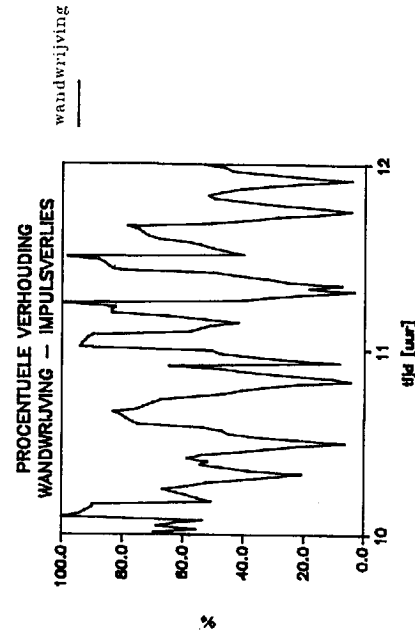
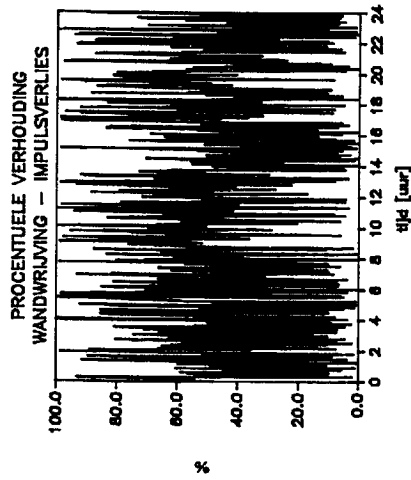
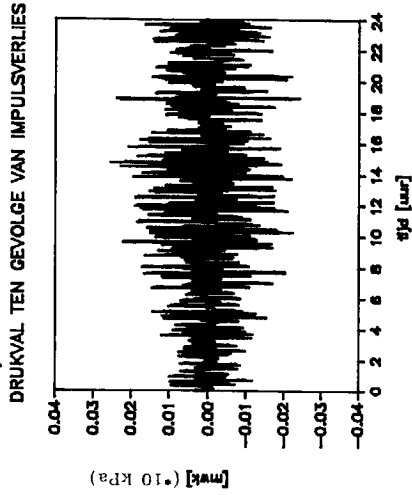
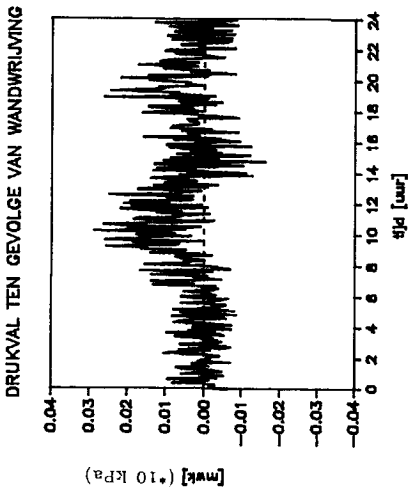
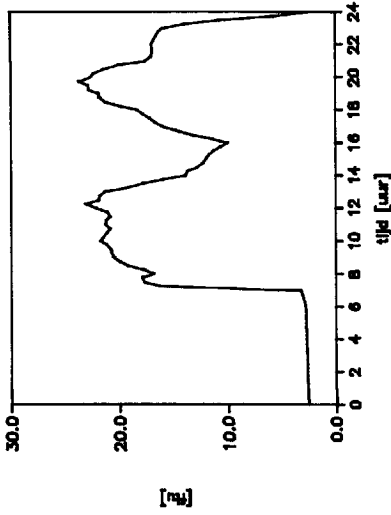


fig. 14 Effecten wandrijving, resp. impulsverlies op de drukval met ruis.

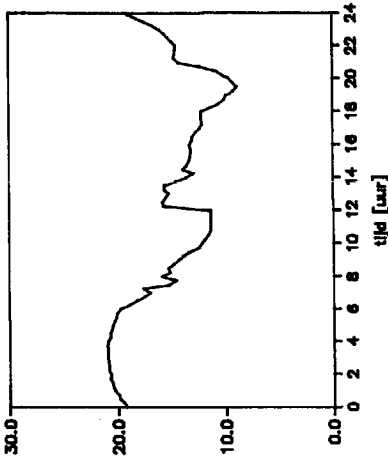
H₂O-KLEIN

KNOOP 3



[E]

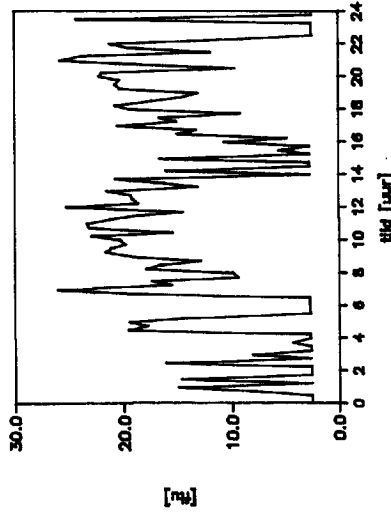
KNOOP 6



[E]

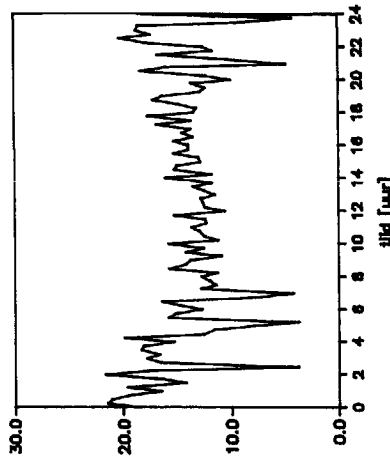
tijdstap 1 uur

KNOOP 3



[E]

KNOOP 6



[E]

tijdstap 5 minuten

fig. 15 Effect invoerstepgrootte op de troebelingsberekening.

TRANSPORTNET LEIDUIN - AMSTERDAM

toetsing op druk (5 t/m 7-6-87 en 14-8-90), vergelijkijk programma's, gevoeligheid k-waarden

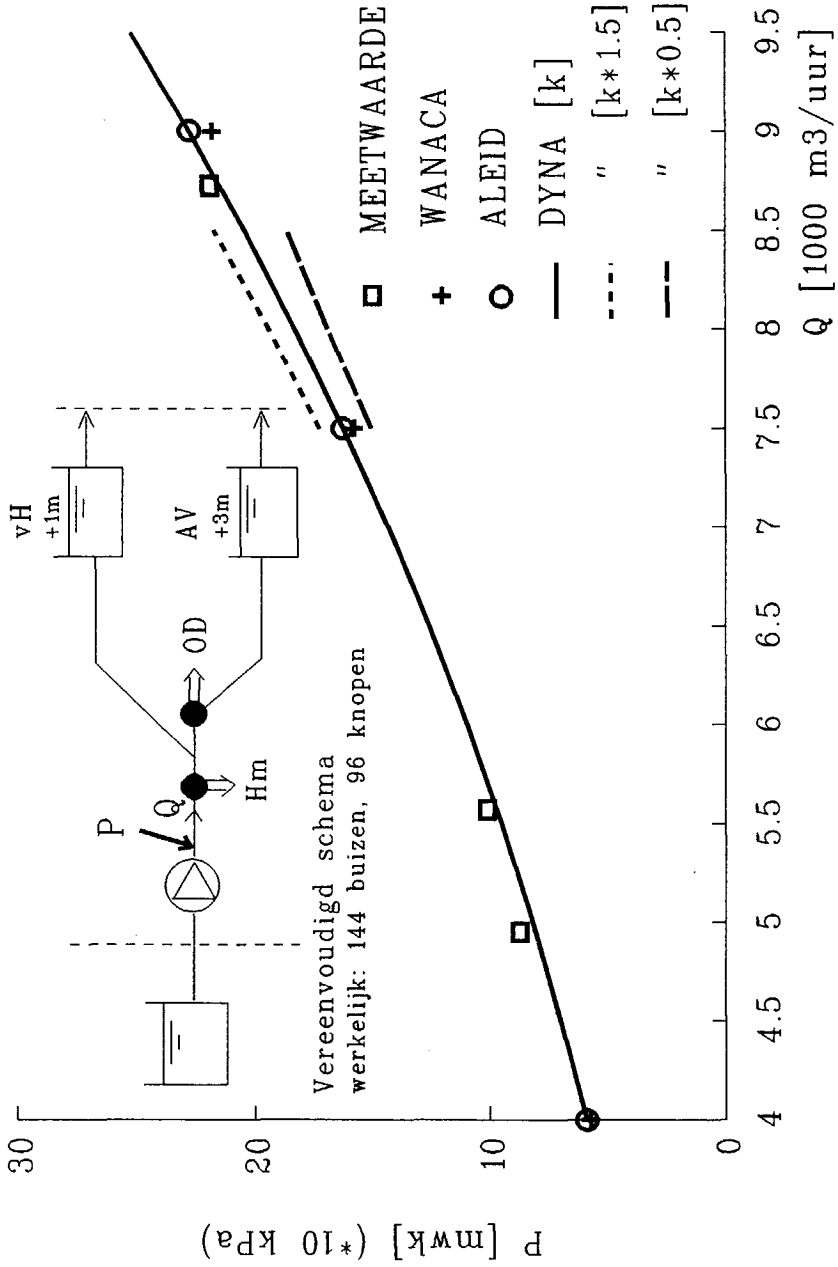
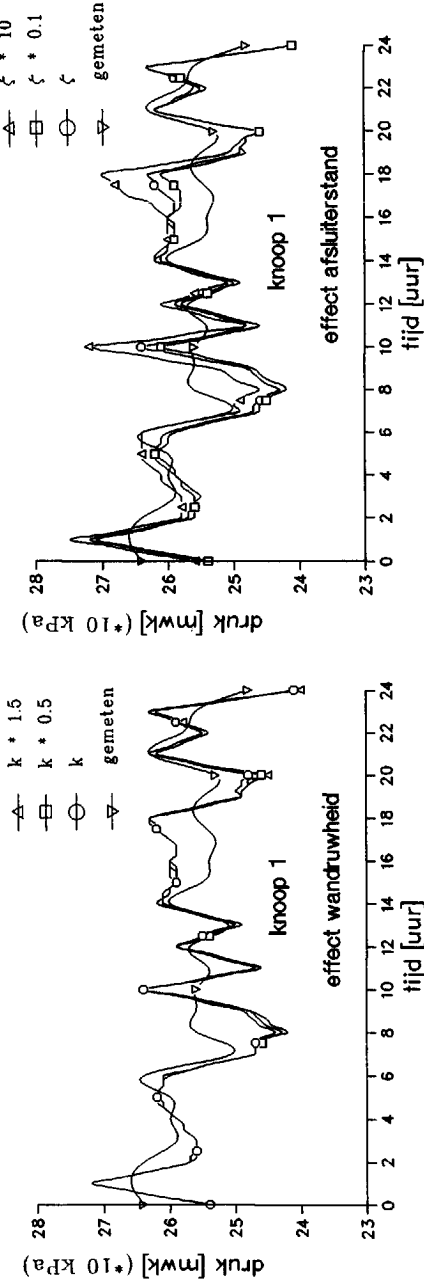


fig.16 Vergelijking momentane drukken.

AMSTERDAM_NOORD_PRIMAIR EN REGIONAAL NIVEAU

toetsing op druk, gevoeligheid wandrijving en afsluiterstand

24-2-87 (invoer 1 uur, rekenstep 15 min.)



26-7-89 (invoer 15 min., rekenstep 5 min.)

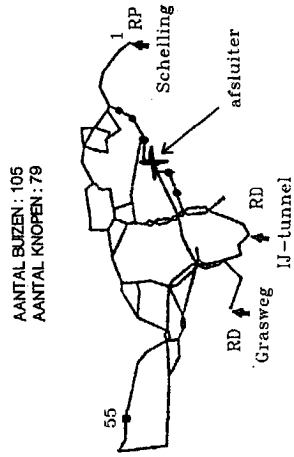
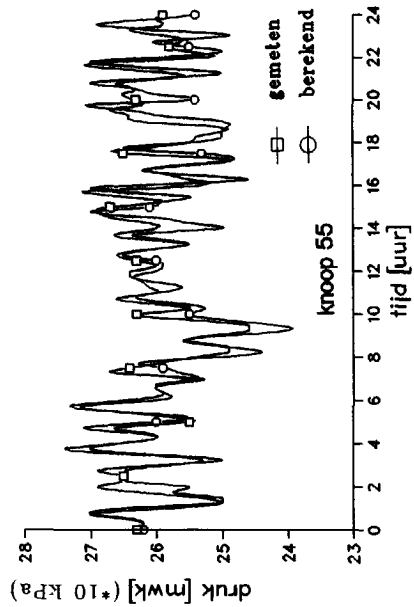
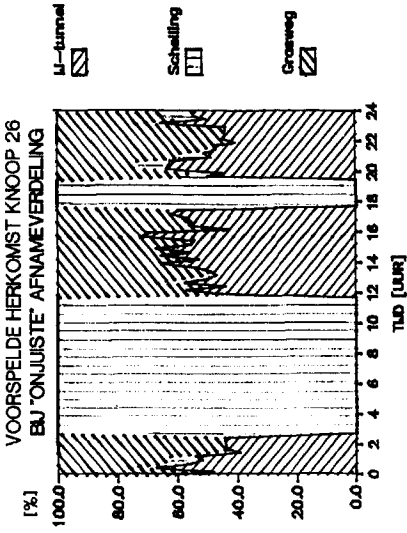
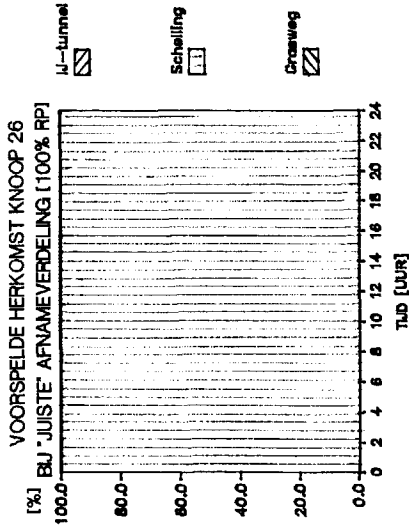


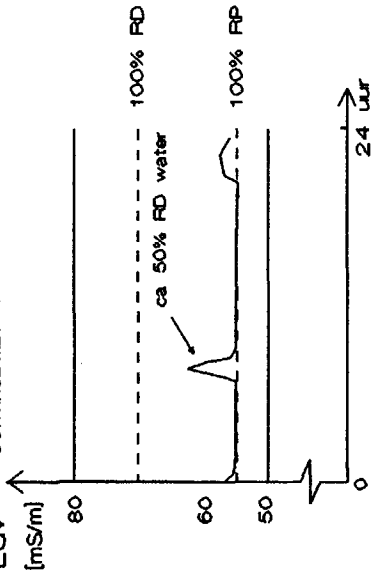
fig. 17 Vergelijking van gemeten en berekende drukverloop.

AMSTERDAM_NOORD PRIMAIR EN REGIONAAL NIVEAU

toetsing herkomst 21-8-1989, gevoeligheid afnameverdeling



EGV CONTINUE METING HERKOMST NABU KNOOP 26



AANTAL BUIZEN : 105
AANTAL KNOEPEN : 79

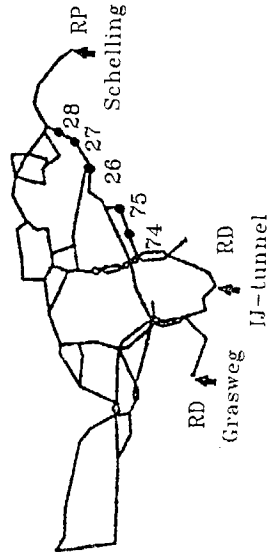
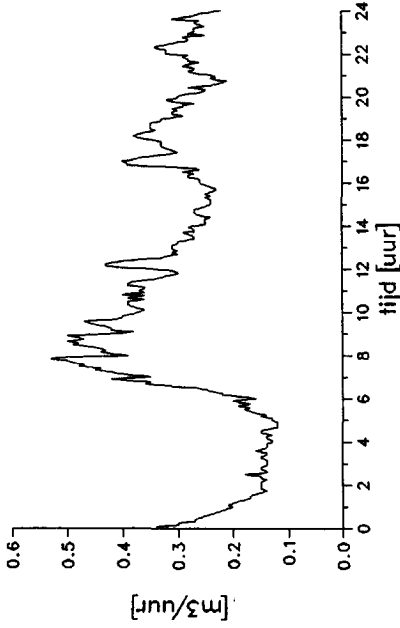


fig. 18 Involed verdeling verbruiken over knopen.

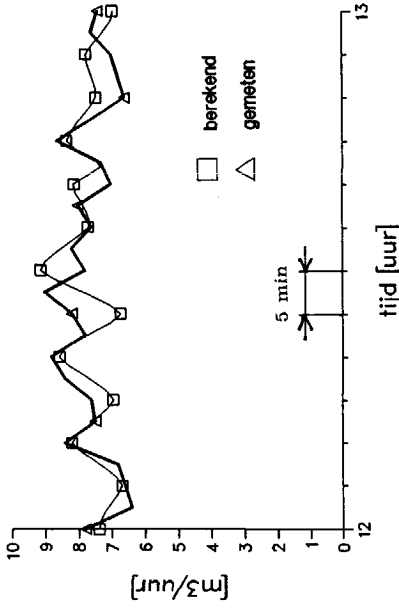
MOLENIJK (LEVERINGSNIVEAU)

toetsing snelheidskarakteristiek (1-12-89), aandeel inertantieterm

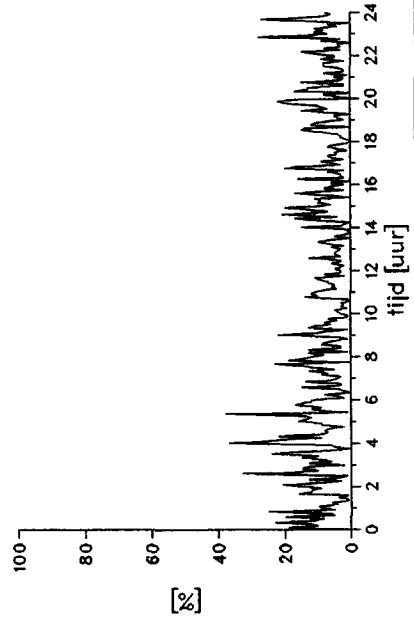
GESIMULEERDE AFNAME
KNOOP 92



VOLLMESTROOM
BUIJS 127



BEREKEND INERTANTIEAANDEEL
BUIJS 127



AANTAL BUIZEN : 48
AANTAL KNOPEN : 42

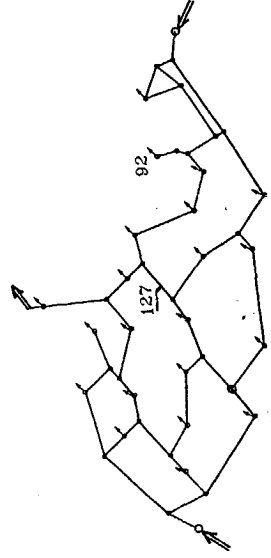
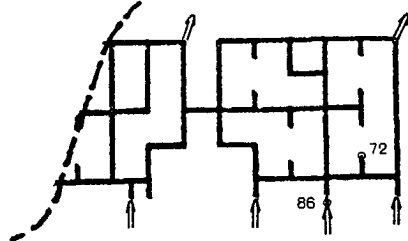
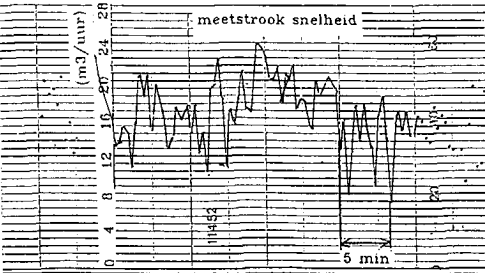
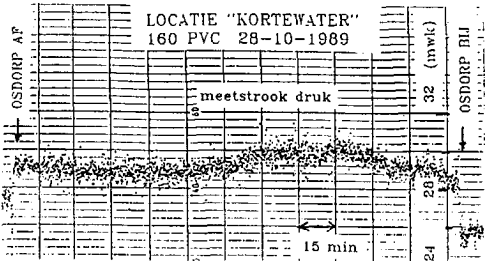


fig. 19 Vergelijking van gemeten en berekende snelheid.

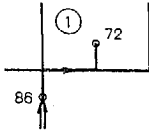
MIDDELVELDSCH E AKERPOLDER



aantal buizen : 99
aantal knopen : 90

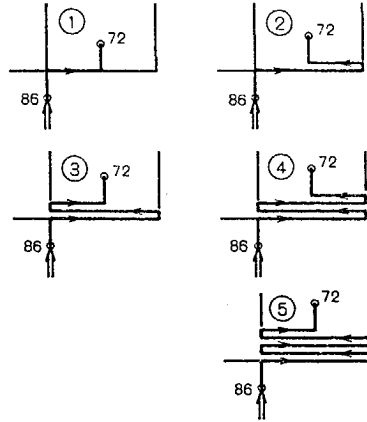
INSTROOMTIJDSTIP 01.00 UUR Voorspelde trajecten

DYNA 1 uur QUALI 5 min.



86-72 fractie 3,5 x tijd 6,1 uur

DYNA 5 min. QUALI 1 min.



86-72 fractie 1,8 x tijd 4,5 uur
86-72 fractie 9,0 x tijd 5,0 uur
86-72 fractie 18 x tijd 5,2 uur
86-72 fractie 0,6 x tijd 5,3 uur
86-72 fractie 0,8 x tijd 5,3 uur

fig. 20 Effect invoertijdstaprootte.

CURRICULUM VITAE

De auteur, geboren op 8 januari 1946 te Amsterdam, behaalde na een start op de LTS gevolgd door avondopleidingen in juni 1969 het diploma HTS mechanische technische technologie. Na de vervulling van zijn militaire dienstplicht ging hij in 1970 studeren aan de toenmalige Technische Hogeschool Delft.

In 1972 werd door hem het kandidaatsexamen afgelegd in de richting werktuigbouwkunde en in mei 1974 het doctoraalexamen (cum laude) met klimaatregeling als hoofdvak en met de bijvakken koude techniek, stromings- en warmteleer en energietechniek.

Hierna heeft hij tot 1982 een adviesfunctie uitgeoefend op de gebieden werktuigbouwkundige installaties, energietechniek en bouwfysica.

Verscheidene publikaties over genoemde vakgebieden zijn van zijn hand verschenen in technisch-wetenschappelijke vakbladen.

Vanaf 1982 is hij werkzaam bij de Gemeentewaterleidingen Amsterdam, als hoofd sector Ontwikkeling, waar onderzoekswerkzaamheden verricht worden ten behoeve van het transport en de distributie van drinkwater. Ook over deze werkzaamheden is in vakbladen een aantal publikaties van zijn hand verschenen.