

1. Inleiding

In het hiernavolgende worden een aantal belangrijke factoren, die bij het economisch ontwerpen van een leidingnet een rol spelen, behandeld. Eerst zal worden ingegaan op enkele meer algemene economische begrippen waarna vervolgens een overzicht wordt gegeven van de mathematische mogelijkheden om een optimaal leidingnet te ontwerpen.

Om het belang van een consequente economisch-technische aanpak van leidingnetontwerpen te kunnen inzien, dient men



IR. J. HAIJKENS

voorheen Hoofd Afd. Onderzoek en Planning Gemeente-Drinkwaterleiding Rotterdam. Thans werkzaam voor de Unesco in Sri Lanka.

zich te realiseren dat een belangrijk deel van de kapitaalgoederen van een drinkwaterbedrijf in de grond kan worden teruggevonden, voornamelijk in de vorm van buisleidingen met toebehoren. Om dit te illustreren is de situatie in het Rotterdamse drinkwaterbedrijf eens onder de loep genomen.

Dit bedrijf verzorgt zowel de zuivering als het transport en de distributie van drinkwater in een groot deel van het Rijnmondgebied.

De zuivering van op het ogenblik ongeveer 120 miljoen m³ oppervlaktewater per jaar geschiedt op twee produktiebedrijven.

De totale lengte van het gehele leidingnet is ruim 2200 km, waarbij de diameters van de leidingen kunnen variëren tussen 6 cm voor distributieleidingen en 1,60 m voor de transportleidingen.

Tabel I geeft enig inzicht in de waardeverhouding tussen het leidingnet van dit Rotterdamse bedrijf en de overige finan-

ciële lastendragers, ingedeeld in slechts enkele hoofdgroepen.

Hierin zijn drie economische begrippen gehanteerd, waarmee een indruk kan worden verkregen van de waarde die elk onderdeel vertegenwoordigt of van de lasten die door elk onderdeel worden veroorzaakt.

Naast de bedragen die in miljoenen gulden staan vermeld, is tevens het percentage van de totale waarde of de gezamenlijke lasten weergegeven. In alle drie gevallen vertegenwoordigt het leidingnet ca. 50 % van de totale waarde van het bedrijf. Overigens zijn tegen de getallen uit de middelste kolom wel bezwaren aan te voeren, aangezien hier ongelijkwaardige gulden bij elkaar zijn opgeteld, doch het gaat slechts om een oppervlakkige vergelijking.

Wanneer we er nu eens vanuit gaan dat door zorgvuldige berekening en afweging van de verschillende alternatieve mogelijkheden ca. 5 % op het leidingnet bespaard kan worden over lange termijn — hetgeen m.i. nog aan de lage kant is — dan betekent dit een verlaging van de totale kapitaallasten met ca. 2,5 %. Daartegenover staat echter dat de inspanningen voor een economische benadering van de nieuw uit te voeren leidingprojecten ook geld kosten. Willen we in het genoemde Rotterdamse voorbeeld net 'quitte' spelen wat de extra besparingen en kosten betreft, dan zou een afdeling van ruim 10 man permanent aan deze problemen kunnen werken. Mijn ervaring is dat dit werk in het Rotterdamse bedrijf door 2 man gedaan kan worden, waarmee het voordeel van een ver doorgevoerde economische optimalisering is aangetoond, althans voor een groot bedrijf. Overigens is het voor een goede economische vergelijking van verschillende alternatieven onontbeerlijk dat aan lange-termijn-planning voor de drinkwatervoorziening in een bepaald gebied wordt gewerkt. Dit betekent dat men moet

kunnen uitgaan van lange-termijn-prognoses betreffende het watergebruik. Vooral in planologisch onrustige gebieden is dit echter een vrijwel onmogelijke zaak en men zal daar geneigd zijn een korte economische levensduur voor de leidingen aan te houden. Aan de andere kant zijn schaalvergroting en toenemende kapitaalintensiviteit eveneens kenmerken van deze tijd, terwijl de technische levensduur van leidingen niet zelden de 50 jaar overschrijdt. Het is onder invloed van deze tegenstrijdigheden dat steeds meer behoefte gaat bestaan aan het beheersen van de toekomstvariabelen en het gevolg is de invoering van lange-termijnplanning in vele, bij ruimtelijke indeling betrokken sectoren.

Nu is het niet relevant om alle leidingen die bij het watertransport zijn betrokken in de lange-termijn-planning op te nemen. Globaal kunnen we een aantal typen van leidingen onderscheiden, ingedeeld naar het transporterend karakter. Zo zijn er:

- aanvoerleidingen, die het drinkwater vanaf de zuiveringswerken naar de verschillende grote verbruikerscentra transporteren;
- hoofdleidingen die het water verder naar de zwaartepunten van het verbruik brengen;
- distributieleidingen die het water over de straten verdelen en
- dienstleidingen die het water bij de verbruiker afleveren.

Voorts zijn er dan nog ruwwatertransportleidingen, die het water transporteren van de plaats van winning naar de plaats van zuivering.

Het zijn in het algemeen de aanvoerleidingen, de hoofdleidingen en de ruwwatertransportleidingen, die in de plannen op lange termijn worden opgenomen. Het is een gangbare methode om eerst een basisplan voor een verweg gelegen eindsituatie te ontwerpen, passend binnen de vastgestelde beleidsdoelstellingen. Vervolgens dienen dan de wegen te worden aangegeven die zo efficiënt mogelijk tot dit einddoel zullen leiden. Dit betekent dat het ontwerpen van een leiding in een reeds bestaande bedrijfssituatie geen op zichzelf staande zaak is, maar dient te passen in de gefaseerde voltooiing van een verkozen eindsituatie. In dit geheel spelen dan niet alleen leidingen een rol, doch tevens de plaats en de capaciteit van andere bedrijfs-onderdelen zoals winnings- en zuiveringswerken, reservoirs, e.d. Overigens is de genoemde geplande eindsituatie geen statisch, onveranderlijk gegeven. Regelmatig dient dit plan opnieuw aan de dan heersende inzichten te worden

TABEL I - (Alle bedragen in miljoenen gulden).

	Boekwaarde 1 jan. 1973	Oorspronkelijke nieuwwaarde (historische kostprijs)	Jaarlasten 1973
Leidingnet	135,7 (52 %)	179,3 (50 %)	afschr. 5,8 rente 9,5 15,3 (50 %)
Produktiebedrijven	121,7 (47 %)	172,7 (49 %)	afschr. 6,3 rente 8,5 14,8 (49 %)
Algemeen (inr. kantoren, laboratoria e.d.)	1,8 (1 %)	3,4 (1 %)	afschr. 0,3 rente 0,1 0,4 (1 %)

getoetst en zonodig aangepast te worden. De grootte van de kleinere distributie- en dienstleidingen kan op veel kortere termijn, binnen het kader, aangegeven door het transportleidingplan, worden vastgesteld.

2. Economische uitgangspunten

Wat onder economisch ontwerpen precies moet worden verstaan kan misschien het best als volgt worden omschreven:

het meest economisch ontwerp is die technisch aanvaardbare oplossing, die op lange termijn de laagste reële kostprijs van drinkwater met zich meebrengt.

Men kan in het algemeen niet zonder meer alle investeringen die een bepaald ontwerp met zich meebrengt en die vaak op verschillende momenten worden gepleegd, bij elkaar optellen om te kunnen bekijken welke oplossing de minste kosten met zich meebrengt. Een bruikbare methode voor economische vergelijking van verschillende technisch aanvaardbare alternatieven is de contante-waarde-methode. Hierbij worden over een zekere periode de jaarlasten die een bepaalde oplossing met zich meebrengt teruggerekend naar een basisjaar. In feite wordt bepaald welk bedrag men zou moeten reserveren om de jaarlasten behorend bij een bepaald ontwerp te kunnen betalen, rekening houdend met rente-opbrengsten van het uitstaande kapitaal. Veronderstellen we bijv. dat om aan de verwachte vraag naar water te kunnen blijven voldoen een van de technisch mogelijke oplossingen met zich meebrengt dat een aantal investeringen op verschillende tijdstippen dienen te worden gedaan. Deze investeringen hebben jaarlijkse lasten a_i tot gevolg, bestaande uit de afschrijving en de rente r voor een bepaald jaar i na de eerste investering. Daarnaast moeten we in de totale jaarlasten tevens de overige lasten b_i incalculeren. Deze worden veroorzaakt door bijv. energieverbruik en onderhoud.

De contante waarde c_w van dit gehele ontwerp berekend ten tijde van de eerste investering is dan over een periode van n jaar na de eerste investering:

$$c_w = \sum_{i=1}^n \frac{a_i + b_i}{(1+r)^i}$$

Het verdient wellicht aanbeveling nog wat nader in te gaan op de grootheden die in deze formule zijn weergegeven. Zo zijn de vaste jaarlasten a_i bijv. afhankelijk van het afschrijvingssysteem, de afschrijvingstermijn en het rentepercentage dat gehanteerd wordt.

Wat de rentevoet betreft kan men zich afvragen welk percentage men in deze economisch vergelijkende beschouwingen dient te hanteren. De rentestand op de

kapitaalmarkt kunnen we simpelweg omschrijven als de grootte, die tot stand komt bij de vraag naar en aanbod van niet-risico-dragend krediet op lange termijn. Zou inflatie niet bestaan, dan zou hieruit een reële rentevoet te voorschijn komen. Inflatie speelt echter wel degelijk een rol en daardoor ontstaat een rentevoet die hoger is dan de eerder gedefinieerde reële rentevoet en die we de nominale rentevoet noemen. Dus: de nominale rentevoet (d.w.z. de huidige 8 à 9 %) bestaat uit een reële rentevoet plus een inflatiecomponent. De vraagstelling betreffende het te hanteren rentepercentage zou dan ook eigenlijk kunnen luiden: moeten we de inflatiecomponent in rekening brengen of niet. Aan het begin van deze paragraaf is een korte definitie gegeven van het 'meest economische ontwerp' en daarin was toen sprake van de laagste reële kostprijs. Dit betekent dat de werkelijke kostprijs moet worden afgewogen tegen bijv. het nationale inkomen.

Het lijkt — zeker uit macro-economische overwegingen — een juiste gedachtengang hiermee inderdaad rekening te houden. Het betekent dat de kostprijs van het water ieder moment wordt afgewogen tegen de koopkracht van het inkomen van de consument. Hetzelfde resultaat kan voor het economisch afwegen van verschillende alternatieve ontwerpen worden bereikt door te rekenen met een waarde vaste gulden, waardoor de inflatie wordt uitgesloten. Dit houdt in dat we rekenen met reële lasten in relatie tot reële inkomens. Voor de eenvoud zijn hier een mogelijke reële stijging van het nationaal inkomen en het feit dat de stijging van de kosten van vaste activa soms boven de inflatie uitgaat, buiten beschouwing gelaten. Wanneer de investeringen voor een bepaald ontwerp worden omgerekend tot jaarlasten om vervolgens de contante waarde van het geheel te kunnen bepalen dan zouden we dus moeten rekenen zonder inflatie. Wat de rentevoet betreft betekent dit dat we rekenen met de reële rentevoet die in het algemeen rond de 4 % zal liggen. Voor de investeringsbedragen rekenen we met waarde vaste gulden. Het berekenen van de jaarlasten is ook afhankelijk van het afschrijvingssysteem dat gehanteerd zal worden. Enkele vormen zijn:

— lineaire afschrijving

d.i. afschrijving volgens een vast percentage van het investeringsbedrag;

— annuïtaire afschrijving

waarbij de jaarlasten voor rente en afschrijving gedurende de gehele afschrijvingsperiode gelijk blijven;

— unitaire afschrijving

waarbij rente en afschrijving evenredig met de prognoselijn voor bijv. het watertransport verlopen. In het algemeen komt het erop neer dat men de totale geprognoseerde afzet waarvoor het project wordt gemaakt, plaatst tegenover het totaal bedrag der investeringen, gerekend binnen een bepaalde periode. Door zowel de afzet als de investeringen te kapitaliseren en vervolgens het quotiënt hiervan te vermenvuldigen met de afzet in een bepaald jaar, verkrijgt men het bedrag voor afschrijving plus rente voor dat jaar.

De vraag of op historische kostprijsbasis of op vervangende kostprijsbasis moet worden afgeschreven is in dit geval niet relevant. Afgesproken was immers dat de vergelijking zou plaatsvinden door met waarde vaste gulden te rekenen, dus bijv. alles in gulden van 1974.

Over de afschrijvingstermijn kan worden gezegd dat die in het algemeen wordt vastgesteld op basis van de economische levensduur van het project. Deze termijn kan dan ook van plaats tot plaats verschillen en is mede afhankelijk van in de toekomst geprojecteerde planologische veranderingen. Als laatste moet dan ook nog de periode worden vastgesteld die in de vergelijking zal worden betrokken. Deze periode dient tenminste zo lang te zijn als de langste afschrijvingstermijn van een der eerste investeringen. Alleen de jaarlasten die binnen deze periode vallen, worden contant gemaakt. Is een project of een onderdeel daarvan aan het eind van deze periode nog niet geheel afgeschreven, dan worden de later komende jaarlasten dus niet in de vergelijking betrokken.

Wanneer de keuze van afschrijvingssysteem, afschrijvingstermijn, reële rentevoet, beschouwingsperiode e.d. hebben geleid tot het vaststellen van de bijbehorende numerieke grootheden, dan kan de contante waarde in een zeker basisjaar van diverse alternatieve ontwerpen worden bepaald. De oplossing, die de laagste contante waarde met zich meebrengt, zou dan de meest economisch zijn en dus de reële kosten van het drinkwater zo laag mogelijk moeten houden.

Dit zou inderdaad prachtig opgaan als de prognoselijn, waarop de technische ontwerpen zijn gebaseerd, een onveranderlijk gegeven zou zijn.

Het zal echter duidelijk zijn dat dit geen zins het geval is. De geprognoseerde ontwikkelingslijn geeft slechts een soort gemiddelde verwachting aan van de toe-

komstige ontwikkelingen, maar met een zeer grote waarschijnlijkheid zal de ontwikkeling deze lijn niet precies volgen.

3. Combineren van onzekerheden en economie voor de keuze uit verschillende ontwerpen

Meer inzicht in de verwachtingen die gekoesterd worden biedt de ontwikkelingsvoorspelling van de toekomst zoals die in afb. 1 is weergegeven.

Wanneer een dergelijke afbeelding samengesteld kan worden, dan heeft het zin ook de doelstelling voor de keuze over omvang en fasering van de technische werken anders te formuleren dan hiervoor is gedaan. We kunnen namelijk naast de kosten, behorende bij een bepaalde oplossing, tevens het risico dat een mediane prognose niet uitkomt in rekening brengen. De opdracht om tot de keuze van de optimale oplossing te kunnen komen, zou nu kunnen luiden:

kies diè technische oplossing, waarvoor de verwachtingswaarde van de vaste en variabele reële kosten op lange termijn minimaal is.

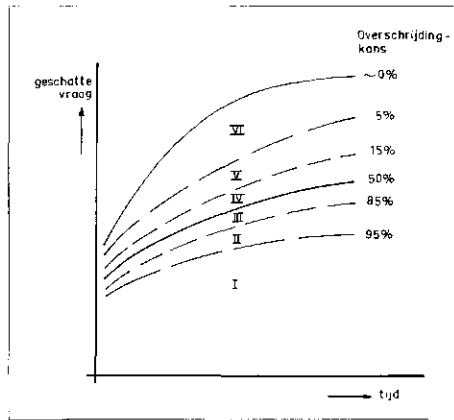
Met het hanteren van het begrip 'verwachtingswaarde' wordt het stochastische karakter van de beschouwingen geïntroduceerd. Dit brengt met zich mee dat voor de verdere oplossing van het probleem wat eenvoudige waarschijnlijkheidsrekening moet worden gebruikt.

De gebieden tussen de lijnen, die een verschillende kans op overschrijding aangeven, zijn in feite waarschijnlijkheidsgebieden. Voor elk van deze gebieden kan de kans worden aangegeven dat de toekomstige ontwikkeling zich binnen dit gebied voltrekt. Zo is in gebied I deze kans 5 %, voor gebied II 10 %, voor gebied III 35 %, voor gebied IV 35 %, voor gebied V 10 % en voor gebied VI 5 %.

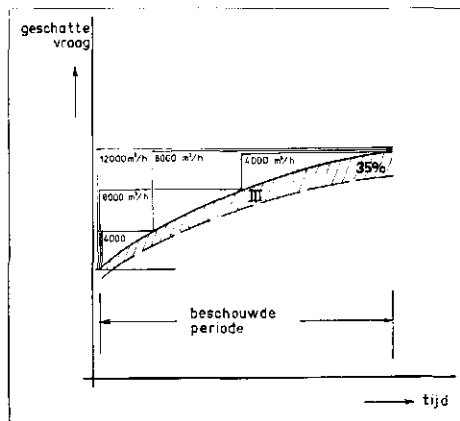
Nu kunnen een aantal alternatieve projectmogelijkheden worden beschouwd tegen de achtergrond van de aldus opgestelde prognosefiguur. Wanneer de bouw van een drinkwaterproductiebedrijf als voorbeeld wordt genomen — hoewel evengoed een ander project onderwerp van beschouwing zou kunnen zijn — dan kan uit een aantal capaciteiten voor realisering van de eerste fase van het project worden gekozen.

Stel dat we rekenen op een uiteindelijke capaciteit van 12.000 m³/h (mediane verwachting), maar dat voor fasering van het project gekozen kan worden uit een verdeling 1/2, 1/2 of 2/3, 1/3 of 1/3, 2/3. Naar behoefte kan het aantal keuzemogelijkheden verder worden uitgebreid.

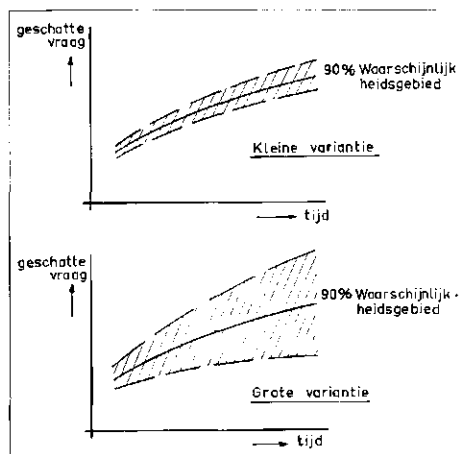
We gaan nu elk van de waarschijnlijkheidsgebieden uit de prognosefiguur — en we kunnen er net zoveel maken als ons



Afb. 1 - Verbruikspggnose uitgedrukt in overschrijdingskansen.



Afb. 2.



Afb. 3.

relevant voorkomt — afzonderlijk in beschouwing nemen. Bekijken we bijv. gebied III (zie afb. 2). Wanneer de vraag naar water zich in dit gebied voltrekt moet de capaciteit van het productiebedrijf steeds groter of gelijk zijn aan de bovengrens van dit gebied om in de behoefte te kunnen voorzien. Eerst kiezen we nog de periode die we in beschouwing willen nemen voor de vergelijking van de verschillende oplossingen. Vervolgens wordt van elke oplossing de contante waarde bepaald. Voor alle waarschijnlijkheidsgebieden I t/m VI kan een dergelijke beschouwing worden opgebouwd. Daaropvolgend wordt de verwachtingswaarde bepaald van de contante waarde van een project dat wordt gestart met de bouw van een bedrijf met een bepaalde capaciteit. Nemen we bijv. het geval dat gestart zou worden met de bouw van een bedrijf met een productiecapaciteit van 8000 m³/h. Voor elk waarschijnlijkheidsgebied is de contante waarde van een dergelijk project gevonden. Deze contante waarde wordt vermenigvuldigd met de kans op realisatie van de vraag binnen het bewuste gebied. De som van deze produkten geeft dan de verwachtingswaarde van de contante waarde van een project, beginnend met de bouw van een bedrijf van 8000 m³/h. Evenzo kan een analoge berekening worden opgezet voor projecten, startend met een andere capaciteit. De gehele berekening kan in tabelvorm geschieden (tabel II).

De laagste verwachtingswaarde is een indicatie voor de meest economische oplossing. In het voorbeeld is dit dus het ontwerp waarin de eerste fase een capaciteit heeft van 8000 m³/h. Welke capaciteit de tweede fase zal krijgen hangt af van de toekomstige ontwikkeling en kan op een later tijdstip worden vastgesteld. Het nemen van een beslissing op deze gronden houdt de mogelijkheden voor een flexibele bedrijfsvoering open doordat tussentijdse bijsturing mogelijk blijft.

In deze benaderingswijze is, naast de hoogte en de tijdstippen van de investeringen, tevens het risico dat dit investeren met zich meebrengt bepalend voor de keuze van de capaciteit van een bedrijf.

TABEL II - (De ingevulde cijfers zijn fictieve bedragen).

gebied	I	II	III	IV	V	VI	
kans	0,05	0,10	0,35	0,35	0,10	0,05	
cap. 1e fase							Totaal
12.000 m ³ /h	15	35	195	245	65	35	590
8.000 m ³ /h	12	30	165	240	70	43	560
6.000 m ³ /h	10	28	160	260	85	47	590
4.000 m ³ /h	8	25	170	280	95	52	630

PROGNOSE			
	<ul style="list-style-type: none"> — economische beschouwing op één moment voldoende 	<ul style="list-style-type: none"> — Hydraulische berekeningen eenvoudig — Eén leiding goedkoper dan 2, minder veiligheid — Gering aantal variabelen voor optimalisering 	<ul style="list-style-type: none"> — voor economische vergelijking lange periode beschouwen
	<ul style="list-style-type: none"> — geen onderbezettingsverliezen te verwachten 	<ul style="list-style-type: none"> — Hydraulische berekeningen tijdrovender — Veel variabelen voor optimalisering — Toepassing 'Operations Research' — Geringe veiligheid 	<ul style="list-style-type: none"> — onderbezetting onvermijdelijk
		<ul style="list-style-type: none"> — Hydraulische berekeningen ingewikkelder; iteratief oplosbaar — Veel variabelen — Berekeningstechniek in ontwikkeling — Grote veiligheid 	<ul style="list-style-type: none"> — faseringsmogelijkheden

TABEL III.

Een dergelijke beschouwing heeft vooral dan zin, wanneer er van een grote variantie van de prognoseverdeling sprake is, zoals in afb. 3 is verduidelijkt. Dit kan zich bijv. manifesteren in een gebied waar men afhankelijk van andere ontwikkelingen met meer dan één waarschijnlijke ontwikkeling van het waterverbruik rekening moet houden. Bijv.: in een zich ontwikkelend industrieel gebied dient binnenkort een nieuw zuiveringsbedrijf te worden gebouwd. Mogelijk vestigt zich over 5 jaar een zeer veel water vragende fabriek in het gebied, doch dit is nog niet zeker. Welke capaciteit dient de eerste fase van dit bedrijf nu te verkrijgen?

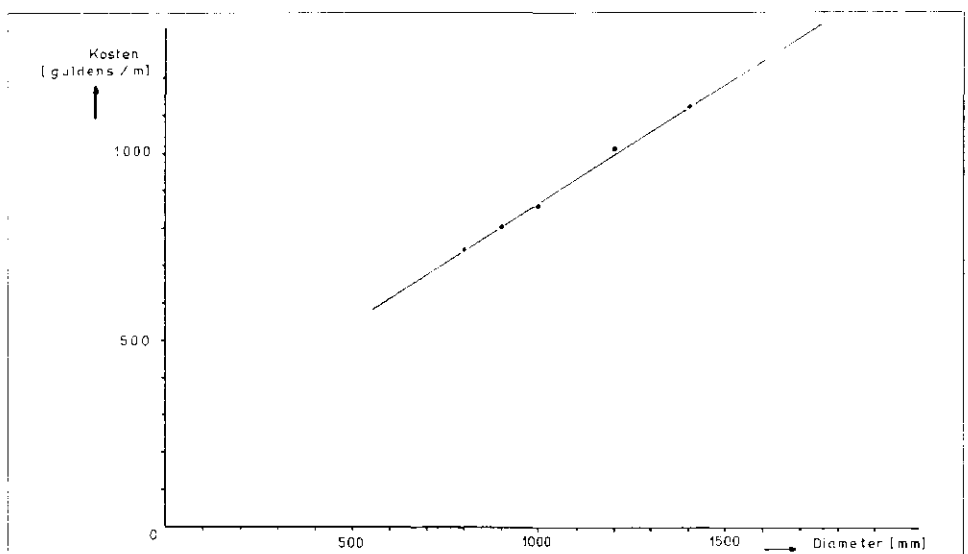
4. Economisch ontwerpen van leidingen

Het betoog is tot nu toe wat algemeen geweest in die zin, dat het beschouwingen betrof die niet alleen op het economisch ontwerpen van leidingstelsels sloegen. In het hiernavolgende zal worden ingegaan op de meer specifieke aspecten verbonden aan economisch ontwerpen van leidingen. Hierbij hoeft het niet alleen om de diameters te gaan. Vooral wanneer een leidingen netwerk in het geding is, is een optimale tracékeuze evenzeer belangrijk. Getracht is een onderverdeling te maken in enkele systemen waarin leidingen kunnen voorkomen. Bij de verdeling is vooral gelet op de wijze van berekenen van de meest economische oplossing (zie tabel III). In de eerste kolom zijn verschillende systemen weergegeven waarin leidingen kunnen voorkomen. In de eerste rij bovenaan zijn 2 soorten prognoses opgenomen waarmee men nogal eens te maken heeft. De eerste prognose geeft een verwachte vraag weer die geen verandering in de loop van de tijd ondergaat. In dit geval maakt het geen verschil voor welk moment de

meest economische oplossing wordt bepaald, mits de variabele kosten geen verandering ondergaan in de loop van de tijd (bijv. stijging energiekosten). Onderbezettingsverliezen spelen geen rol en een lange termijn benadering is niet noodzakelijk.

Is er echter sprake van een prognose waarin met een toenemende vraag rekening wordt gehouden, dan is een beschouwing op lange termijn altijd gewenst. Tijdelijke onderbezetting is onvermijdelijk en gestreefd moet worden naar een optimale fasering, waarbij zowel de verwachte kosten als het risico dat wordt gelopen, een rol spelen. Genoemde aspecten zijn onafhankelijk van het beschouwde leidingsysteem. Daarnaast is ook nog wel het een en ander op te merken over elk van de drie onderscheiden leidingsystemen afzonderlijk.

Afb. 4 - Benaderd lineair verband tussen diameter en totale kosten van aanleg en materiaal voor betonnen leidingen, met inbegrip van voorbereidingskosten, kosten van fundering over 50% van het werk en overhead-kosten.



a. Niet-vertakte leidingen

Zo zijn in het geval, waarin water wordt verpompt van het ene punt naar het andere zonder dat distributie in het systeem plaatsvindt, de hydraulische berekeningen relatief eenvoudig. In het algemeen kan gezegd worden dat één leiding goedkoper is dan twee, maar dat vaak uit veiligheidsoverwegingen voor het laatste wordt gekozen. Ook dan is echter evengoed een optimalisatie van beide diameters mogelijk. Hoewel de berekeningen eenvoudig zijn, wordt toch nog enige aandacht geschonken aan deze situatie in verband met de actuele ontwikkelingen in de energieprijzen. Het zal duidelijk zijn dat een stijging van de energieprijzen directe gevolgen kan hebben voor de keuze van de diameters van nieuwe transportleidingen. De tendens zal zijn om grotere transportleidingen aan te leggen dan voorheen, aangezien dit minder verlies van energie tot gevolg zal hebben. Om een indruk te krijgen van het kwantitatieve effect van een dergelijke prijsverhoging kan hieraan nog wat verder worden gerekend.

Uit afb. 4 blijkt dat de kosten van aanleg en materiaal per strekkende meter leiding bij benadering lineair afhankelijk zijn van de diameter D volgens de formule:

$$K = 640 \cdot D + 230$$

(K in gulden, prijspeil 1974, D in m) voor diameters van betonnen leidingen, variërend van $\varnothing 0,6$ m tot $\varnothing 1,4$ m.

Afgeschreven in 40 jaar tegen 4% rente en volgens annuïteiten brengt dit jaarlasten met zich mee van:

$$k_1 = 0,0505 (640 \cdot D + 230) \quad \text{of}$$

$$k_1 = 32,3 \cdot D + 11,6 \quad (1)$$

Het energieverlies in een leiding, waarin een constant debiet Q wordt getransporteerd, kan uit het optredende wrijvingsverlies worden berekend. Het wrijvingsverlies per strekkende meter leiding kan worden gesteld op:

$$\Delta H = \lambda \times \frac{1}{D} \times \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

waarin:

- ΔH = wrijvingsverlies in bijv. m per strekkende meter leiding
- λ = coëfficiënt afhankelijk van Reij-noldsgetal, diameter en wandruw-heid
- D = diameter in m
- v = gemiddelde snelheid in m/sec
- g = versnelling van de zwaartekracht in m/sec²

Voorts kan de gemiddelde snelheid v geschreven worden als:

$$v = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} D^2} \quad (3)$$

Na samenstelling van de vergelijkingen (2) en (3), waarbij voor λ een waarde van 0,02 wordt aangenomen, volgt:

$$\Delta H = 0,0016 \frac{Q^2}{D^5}$$

Het energieverlies per jaar per strekkende meter leiding is dan:

$$\Delta E = \frac{Q \times \Delta H}{360 \times \eta} \times 31.536.000 \text{ kWh} =$$

$$\frac{145}{\eta} \frac{Q^3}{D^5} \text{ kWh}$$

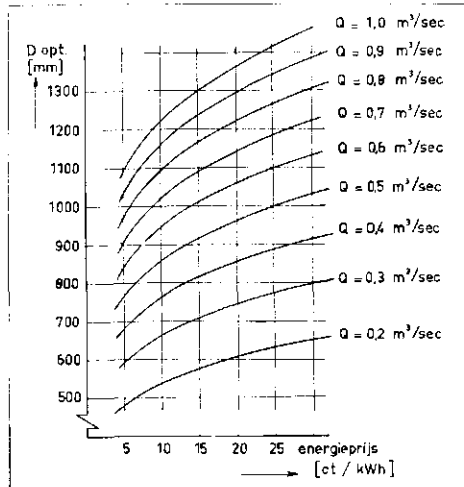
waarin:

- Q = debiet in m³/sec
- η = rendement energie-overdracht

Worden de kosten van een kWh gesteld op c_e gulden, dan zijn de jaarlijkse kosten k_e verbonden aan het energieverlies per strekkende meter leiding:

$$k_e = \frac{145}{\eta} \frac{Q^3}{D^5} \cdot c_e \quad (4)$$

Om de optimale diameter te vinden moet het minimum bepaald worden van de vaste plus variabele kosten, hetgeen kan worden bereikt door het minimaliseren van de kosten van aanleg en materiaal plus de kosten van het energieverlies. Dit betekent dat het minimum moet worden bepaald van de gesommeerde kosten, vermeld in de vergelijkingen (1) en (4), dus:



Afb. 5 - Verband tussen energieprijis en optimale diameter ($\eta = 0,7$).

minimaliseer $32,3 \cdot D + 11,6 + \frac{145}{\eta} \frac{Q^3}{D^5} \cdot c_e$

Differentiëren en gelijk aan nul stellen geeft:

$$32,3 - \frac{725}{\eta} \frac{Q^3}{D^6} \cdot c_e = 0$$

of

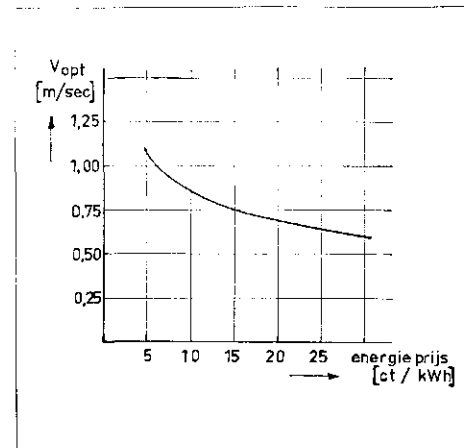
$$D_{opt} = \sqrt[6]{\frac{22,5 \times Q^3}{\eta} \times c_e} \quad (5)$$

Deze vergelijking kan in grafiek worden gebracht voor verschillende debieten, hetgeen in afb. 5 is weergegeven (voor $\eta = 0,7$).

De gemiddelde snelheid, behorende bij een constant transport door een leiding met optimale diameter, is:

$$v_{opt} = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} D_{opt}^2}$$

Afb. 6 - Verband tussen energieprijis en optimale diameter ($\eta = 0,7$).



Substitueren we hierin de D_{opt} uit vergelijking (5) dan volgt:

$$v_{opt} = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} \cdot Q \cdot \sqrt[3]{22,5 \times \frac{c_e}{\eta}}}$$

of

$$v_{opt} = \sqrt[3]{\frac{2,8 \cdot \eta}{\pi^3 \cdot c_e}}$$

Hieruit blijkt dus dat de optimale gemiddelde snelheid onafhankelijk is van het debiet Q.

Bij een bepaalde kWh-prijs hoort een bepaalde optimale snelheid. Dit kunnen we ook nog eens in grafiek brengen (zie afb. 6). Dit alles is berekend voor een constant debiet Q. Is het transport onregelmatig dan moeten we met het gemiddelde debiet gaan rekenen.

De berekening van de energieverliezen kan dan echter niet via hantering van het gemiddelde debiet geschieden.

Nu geldt per strekkende meter leiding voor het energieverlies per jaar:

$$\Delta E = \int_{t=0}^{1 \text{ jaar}} \frac{Q \times \Delta H}{360 \times \eta} dt =$$

$$\int_{t=0}^{1 \text{ jaar}} \frac{\lambda \cdot 8}{360 \cdot \eta \cdot g \cdot \pi^2} \cdot Q^3 dt$$

Voor niet te grote onregelmatigheden in

$$\text{het transport — bijv. } \frac{Q_{max}}{Q_{gem}} < 1,2 —$$

zal de fout minder dan 10 % zijn wanneer toch met Q_{gem} wordt gerekend.

Bij transport door leidingen zonder distributieoogmerk is een afweging van kosten van aanleg en onderhoud tegen energiekosten in het algemeen een goede methode om een optimum te vinden. Randvoorwaarde kan nog wel de sterkte van het buismateriaal zijn. In sommige gevallen kan een sterkere buis worden toegepast wanneer hoge inwendige drukken in de optimale oplossing worden gevonden.

b. Vertakt leidingstelsel

Anders wordt het echter wanneer wel distributie plaatsvindt. Veelal zal men dan met een leidingnetstructuur te maken hebben. Het toelaatbare drukverval van het pompstation tot aan de randen van het distributiegebied zal beperkt zijn. Dicht bij het pompstation mag de druk op de tap-punten niet te hoog zijn (max. bijv. 50

mwk), terwijl aan de randen van het net nog een druk van 20 m boven straatniveau is gewenst.

Hebben we te maken met een vertakt leidingnetwerk, dus zonder gesloten mazen, dan kan worden begonnen met het berekenen van het optimale ontwerp door het minimum te zoeken van de vaste en variabele kosten. Blijkt dat in het distributie-pompstation een te grote opvoerhoogte is vereist, dan kan men twee kanten op om een betere oplossing te zoeken. Ten eerste kan men overwegen om in het voorzieningsgebied opjagers in het transportleidingnet te plaatsen, waardoor de opvoerhoogte in het centrale pompstation kan worden verlaagd. Een andere oplossing is het maximum toelaatbare drukverval tussen pompstation en de randen van het gebied als uitgangspunt voor de berekening te nemen en vervolgens dat netwerk te berekenen dat de laagste investeringskosten met zich meebrengt. In een dergelijk geval dient men voor de belasting van het leidingnet uit te gaan van het maximum momentverbruik, aangezien die situatie maatgevend is voor de eis ten aanzien van het toelaatbare drukverval.

In het vertakte leidingnet is het aantal leidingen ten opzichte van de niet-vertakte leiding sterk toegenomen en daarmee het aantal variabelen voor optimalisering. Tenminste als het gaat om een geheel nieuw aan te leggen net. Wanneer de tracering reeds volledig vaststaat dan kan het economisch ontwerpen van het net op betrekkelijk eenvoudige wijze gebeuren. In wezen gaat het dan om hetzelfde systeem als hiervoor voor de niet-vertakte leiding is beschreven, aangezien van knooppunt tot knooppunt de te transporteren hoeveelheden bekend kunnen worden verondersteld. Is er echter nog vrijheid in de keuze van de tracés dan is een optimalisatie van de diameters en de tracering uit te voeren met behulp van mathematische technieken die aan de 'operationele research' zijn ontleend. Zeer in het kort komt het erop neer dat een basisoplossing wordt samengesteld waarin alle in principe bruikbare tracés zijn opgenomen.

De leidingen verbinden knooppunten waarin het verbruik geconcentreerd is gedacht en aan elke leiding wordt een geschatte diameter toegekend. Door een weloverwogen keuze van deze diameters in de basisoplossing kan het optimalisatieproces worden versneld. Nu wordt stapsgewijs naar het optimale systeem toegevoerd door telkens een zodanige wijziging aan te brengen dat de nieuwe oplossing steeds goedkoper is dan de vorige.

Wanneer wordt gewerkt met een maximum toelaatbaar drukverval in het voorzienings-

gebied dan kan dit worden ingevoerd door een grens te stellen aan het drukverval per kilometer of door een maximum toelaatbare snelheid in te voeren. Het is o.a. om deze reden dat men nogal eens een empirische maximale snelheidsgrens hanteert, die vrijwel altijd onder de optimale snelheid zal liggen. Andere redenen voor beperking van de maximale snelheid kunnen zijn:

- verwachte roestklachten in oude leidingnetten waarin voorheen een lagere maximale snelheid optrad;
- extra groot lekverlies door hoge begindrukken;
- groter waterverbruik in geval van hogere druk op de tappunten.

Met het vaststellen van een dergelijke bovengrens is in feite het verband gelegd tussen diameter en capaciteit van een leiding. Gerekend wordt in deze situatie met het maximum verbruik, terwijl het optimum van uitsluitend de investeringskosten wordt bepaald.

Beter is het verband tussen diameter en capaciteit niet vooraf vast te leggen. Naar goede methoden van aanpak is veel onderzoek gedaan, vooral nadat het gebruik van elektronische computers op grote schaal mogelijk werd. Toch werd nog geen universele directe oplosmethode gevonden. Soms wordt het probleem lineair gemaakt door het aanbrengen van vereenvoudigingen of door andere variabelen dan het debiet te kiezen. In andere methoden wordt een resultaat bereikt door een interatieve partiële benadering. Steeds echter vormen twee typen van berekening tezamen de wetenschappelijke grondslag voor het oplossen van het probleem, nl.:

- een hydraulische berekening (bijv. volgens Hardy-Cross);
- een optimaliseringsberekening (bijv. lineaire of niet-lineaire programmering).

c. Vermaasde leidingstelsels

De optimale oplossing van de aldus gestelde vraagstukken laat steeds een vertakt netwerk zien. Dikwijls zal men echter in de praktijk de voorkeur geven aan een vermaasd netwerk waarin elk knooppunt van meer dan één kant van water kan worden voorzien. Hiermee wordt bereikt dat ook in ongunstige omstandigheden (bijv. leidingbreuk) toch nog in elk knooppunt een redelijke hoeveelheid water geleverd kan worden.

Het betekent dat extra condities aan de bestaande modellen toegevoegd moeten worden, die garanderen dat in de optimale oplossing toch een bruikbare vermaasde

structuur van het leidingnet wordt gevonden. Aan de ontwikkeling hiervan wordt gewerkt.

De systemen die ten behoeve van de watervoorziening in Nederland ontstaan, worden steeds ingewikkelder. Door het streven naar concentratie van waterleidingbedrijven worden de bedrijfseenheden steeds omvangrijker en koppeling van voorheen gescheiden netten komt steeds meer voor. Daarnaast ontstaan er door de toenemende waterbehoefte steeds meer aanrakingsvlakken tussen de waterleidingbedrijven op het gebied van de winning van ruw water.

Om deze redenen is het mijns inziens dan ook van groot belang dat geavanceerde technieken gecoördineerd of eventueel centraal worden ontwikkeld en toegepast om, ondanks de sterke toeneming van de beslissingsvariabelen, op verantwoorde wijze beslissingen met betrekking tot de watervoorziening in Nederland of onderdelen daarvan te kunnen blijven nemen.

Literatuur

- Toekomstonderzoek: theorie en praktijk.* NV Uitgeversmaatschappij Kluwer, Deventer.
- Balen, G. M. van; *Enige financieel-rekenkundige aspecten in praktijk en theorie.* VUGA NV, 's-Gravenhage, 1970.
- Beverwijk, M. en Smeets, M.; *Fasering van de investeringen in de drink- en industriewatervoorziening in Nederland.* H₂O (7) 1974; nr. 1, blz. 2 e.v.
- Achttienribbe, G. E. en Haijkens, J.; *Fasering van de investeringen in de drink- en industriewatervoorziening in Nederland. Een wederwoord.* H₂O (7) 1974; nr. 6, blz. 102 e.v.
- Hillier, F. S. en Lieberman, G. J.; *Introduction to Operations Research.* Holden-day Inc., 1967.
- Cembrowicz, R. G.; *Optimierung von Rohrnetzen.* GWF-Wasser/Abwasser 114 (1973) H.3, blz. 118 e.v.
- Kally, E.; *Automatic planning of the least-cost water distribution network.* Water and water engineering, April 1971, blz. 148 e.v.

