Fasering van de investeringen in de drink- en industriewatervoorziening in Nederland

Bij de planning van de toekomstige werken van de drink- en industriewatervoorziening in Nederland speelt de optimale verdeling van het water over de gebruikers een belangrijke rol. Enerzijds heeft men te maken met watervoorzieningsprojekten die in type, plaats, vorm en grootte kunnen variëren, anderzijds met voorzieningsgebieden, waarin de prognose van de waterbehoeften aan bepaalde schommelingen onderhevig is. Teneinde nieuwe ontwikkelingen, zowel op het gebied van de techniek als die in de behoeftensector, tijdig te kunnen beoordelen en in de planning in te passen, is de behoefte ontstaan aan optimaliseringsmodellen, die zich lenen voor berekening door middel van komputers.
De ontwikkeling van een dergelijk mathematisch model is medio 1971 ter hand genomen door drs. G. Vankan en ir. H. Werner, die daartoe gedurende een jaar op projektbasis ten behoeve van het Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening in dienst van het Stafbureau Lange Termijn Planning van het Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne werkzaam waren. Deze studie werd eind 1972 op dezelfde basis voortgezet door drs. M. Beverwijk en ir. M. Smeets, die over de resultaten van hun werkzaamheden in het onderhavige artikel verslag doen. Ondersteuning werd verleend door medewerkers van de Katholieke Hogeschool Tilburg en de Technische Hogeschool Eindhoven.
Het optimaliseringsmodel in zijn huidige vorm zal nog verdere verfijningen moeten ondergaan, alvorens het als volledig operationeel en beleidsonderbouwend instrument kan worden aangemerkt. De verdere uitwerking van het model zal binnen het Stafbureau Planning van het RID door gespecialiseerde krachten op het gebied van de operations research onder leiding van ir. P. J. Verkerk ter hand worden genomen.

IR. P. SANTEMA, Directeur van het Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening

1. Inleiding

In het op korte termijn uit te brengen 'Ontwerp Structuurschema Drink- en Industriewatervoorziening 1972 [1] is het beleidsvoornemen van de regering ten aanzien van de drink- en industriewatervoorziening geformuleerd. De opstelling ervan heeft plaatsgevonden tegen de achtergrond van de volgende doelstelling van de openbare watervoorziening:
'De doelstelling van de openbare drink- en industriewatervoorziening is de veilige, ononderbroken levering van voldoende water van voldoende druk en van goede en konstante kwaliteit, op een nationaal ekonomisch en maatschappelijk verantwoorde wijze, teneinde te voorzien in de behoeften van bevolking en bedrijven, op een zodanige wijze dat andere belangen zo weinig mogelijk worden geschaad, een harmonische inpassing in de gewenste ruimtelijke struktuur wordt verkregen, een bijdrage wordt geleverd aan de gewenste ekonomische ontwikkeling, waarbij de milieuhygiënische uitgangspunten en de algemeen ekologische kondities in acht worden genomen [2]'.
Het struktuurschema geeft een aantal voorzieningen aan die garanderen dat aan de waterbehoefte tot het jaar 2000 kan worden voldaan. Deze voorzieningen omvatten werken van winning, zuivering, opslag en transport. De totale kapaciteit van de in het struktuurschema als mogelijk aangemerkte waterwinprojekten bedraagt ca. 6 miljard m³/jaar. De totale Nederlandse drink- en industriewaterbehoefte wordt op dit moment, uitgaande van een bevolkingsprognose van rond 16 miljoen, geraamd op 4 miljard m³ voor het jaar 2000. Het verschil van ca. 2 miljard m³ jaarkapaciteit tussen het totaal van de mogelijke projekten en de verwachte behoefte in 2000, biedt de mogelijkheid naast een keuze een aantal alternatieve oplossingen aan te geven. Zie ook [3].

DRS. M. BEVERWIJK *)
DSM, Heerlen

IR. M. SMEETS *)
Nederlandse Spoorwegen, Utrecht

*) Beide auteurs hebben ongeveer een jaar onder arbeidscontract en in dienst van het ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne, bij het Rijksinstituut voor Drinkwatervoorziening gewerkt.

2. Probleemformulering

De mogelijke kriteria om de keuze te bepalen binnen de aangegeven 6 miljard m³ jaarkapaciteit volgen uit de boven aangegeven doelstelling van de openbare watervoorziening:

1. kriteria betreffende kwantiteit;
2. kriteria betreffende kwaliteit;
3. nationaal ekonomische kriteria m.b.t. de sektor watervoorziening;
4. planologische kriteria;
5. milieuhygiënische en ekologische kriteria;
6. kriteria betreffende andere belangen b.v. landbouw.

Om te komen tot het opstellen van een aantal mogelijkheden, waaruit m.b.v. de kriteria onder 4 t/m 6 een keuze gedaan kan worden, wordt, uitsluitend rekening houdend met de kriteria onder 1 t/m 3, voor het volgende probleem een oplossing gezocht:

Op welke tijdstippen *(wanneer)* moeten welke waterwinprojekten en welke transportleidingen *(waar)* met welke kapaciteit *(hoeveel)* in gebruik genomen worden, zodat steeds aan de vraag naar water van een bepaalde kwaliteit kan worden voldaan en het totaal van transport- en produktiekosten, inklusief de kosten van overkapaciteit, minimaal is.

Dit probleem oplossen komt neer op het bepalen van de kapaciteit als funktie van de tijd voor projekten en leidingen.

Er zijn 3 aspekten te onderscheiden:

1. de toewijzing;
2. de bepaling van de starttijdstippen;
3. de fasering van de kapaciteitsuitbreidingen.

3. Het toewijzingsprobleem

De probleemformulering

Begonnen is het toewijzingsprobleem voor het jaar 2000 te onderzoeken [4]. We kunnen dit probleem als volgt formuleren:

Aan welke drinkwaterproducenten *(waar)*, met welke kapaciteit *(hoeveel)*, moet de produktie van drinkwater worden toegewezen, zodat aan de vraag in het jaar 2000 wordt voldaan en het totaal van transport- en produktiekosten minimaal is.

Een optimaliseringsmodel

Het toewijzingsprobleem is te formuleren in termen van een lineair programmeringsmodel (zie appendix 1). Lineair programmeren (l.p.) is een optimaliseringsmethode waarbij een lineaire doelfunktie geoptimaliseerd wordt, onder een aantal nevenvoorwaarden. De doelfunktie is in dit probleem de som van de produktie- en transportkosten, deze wordt geminimaliseerd.
In de nevenvoorwaarden wordt geëist dat de totaal te leveren hoeveelheid drinkwater aan een afnemer gelijk is aan zijn behoefte. Voor de waterwinprojekten, de leveranciers in dit model, wordt in de nevenvoorwaarden een maximale kapaciteit tot uitdrukking gebracht.

De afnemers

Voor de bepaling van de behoefte in het jaar 2000 is gebruik gemaakt van de ramingen zoals deze op het RID in het kader van het 'Ontwerp Structuurschema drink- en industriewatervoorziening 1972' gemaakt zijn. Voor het model is Nederland verdeeld in 20 regio's, die gevormd zijn door bundeling van ekonomisch geografische gebieden. Per regio is de behoefte gekoncentreerd in het zwaartepunt.
Deze zwaartepunten vormen de afnemers in bovenstaand model. Verder is per regio een raming gemaakt van de maximaal toelaatbare hoeveelheid winbaar grondwater.

De leveranciers

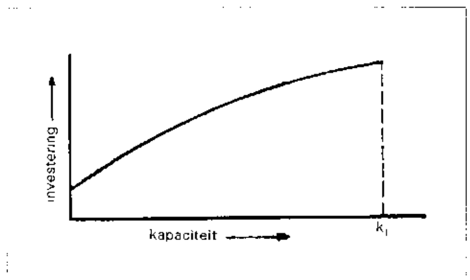
Het struktuurschema geeft 25 mogelijke waterwinprojekten aan, dit zijn de leveranciers in het l.p. model. Voor de maximale kapaciteiten van de verschillende projekten zijn de waarden aangehouden zoals vermeld in het struktuurschema.
Voor de verschillende komponenten van een waterwinprojekt zoals spaarbekken, zuiveringsinstallatie, inlaatpompstation etc. is een verband tussen investeringen en kapaciteit bepaald. Door de deel-investeringen per projekt bij elkaar te tellen kunnen we, rekening houdend met de specifieke omstandigheden, een investeringsfunktie bepalen, die het verband aangeeft tussen de investeringsbedragen en de kapaciteit.

De produktie- en transportkosten

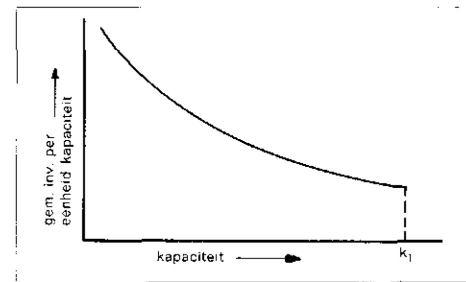
Alvorens in te gaan op de kostprijsberekening willen we stellen dat de gehanteerde afschrijvingstermijn, rentevoet en verdere kostencijfers vrij arbitrair zijn en dat andere cijfers gemakkelijk ingebracht kunnen worden. In dit stadium heeft de ontwikkeling van het optimaliseringsmodel voorop gestaan. Een nadere detaillering en precisering van de gehanteerde cijfers zal bij het operationeel worden van het model nodig zijn. De prijzen zijn berekend met een afschrijvingstermijn op de investeringsbedragen van 40 jaar, rekening houdend met een rentevoet van 8 %. Dit levert een annuïteit van 0,085. Voor de jaarlijkse kosten van onderhoud en bediening wordt 1 % van de investering genomen, zodat de totale jaarlasten 9,5 % van de investering bedragen. Aan kosten voor chemicaliën wordt 5 ct/m^3 voor oppervlaktewater gerekend. Met de energiekosten is in dit model geen rekening gehouden.
Het investeringsbedrag (I) als funktie van de kapaciteit (KAP) wordt verondersteld van de volgende vorm te zijn:

$I = a \cdot KAP^b + c$ [gld] met $b < 1$

De konstanten a, b en c zijn afhankelijk



Afb. 1 - De vorm van de investeringfunktie; k_1 is de maximale kapaciteit.



Afb. 2 - De invloed van het schaaleffekt.

van het waterwinprojekt en zijn op de in de vorige paragraaf beschreven wijze bepaald. We veronderstellen een positief schaaleffekt, d.w.z. de exponent in de investeringsfunktie (= b) is kleiner dan 1.
Dit heeft tot gevolg dat de gemiddelde investering per eenheid kapaciteit afneemt bij toenemende maximale kapaciteit.
Een en ander is aanschouwelijk gemaakt in afb. 1 en 2.

Voor direktiekosten en bouwrente wordt 20 % van het investeringsbedrag genomen. De kosten van rente en afschrijving en de kosten van onderhoud en beheer als funktie van de kapaciteit zijn dan, bij volledige bezetting:

$$\frac{0{,}095 \cdot 1{,}2 \cdot (a \cdot KAP^b + c)}{KAP} \quad [\text{gld/m}^3]$$

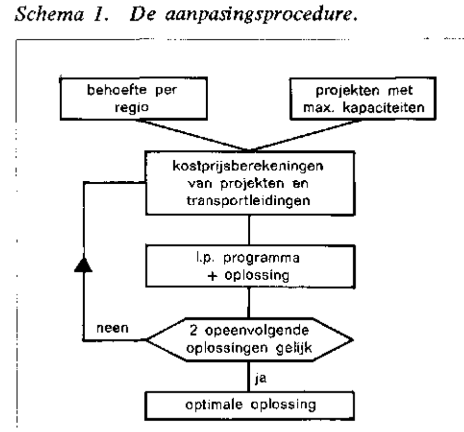
Voor de berekening van de transportkosten per m^3 per kilometer bij volledige bezetting zijn dezelfde veronderstellingen omtrent investeringsfunktie, rente en afschrijvingstermijn aangehouden als bij de berekening van de projektkosten.
Wil men lineair programmeren toepassen dan zal de kostprijs per eenheid produkt onafhankelijk moeten zijn van de geproduceerde hoeveelheid. In afb. 2 hebben we gezien dat de gemiddelde investering per eenheid kapaciteit bij vergroting van de maximale kapaciteit afneemt. Dit heeft voor de kostprijs een identiek verloop tot gevolg, rekening houdend met de maximale kapaciteit. De kostprijzen, die in het l.p. model moeten worden meegenomen, zijn niet op een juiste wijze te bepalen omdat de kapaciteiten waarmee ze moeten worden berekend, in eerste instantie niet bekend zijn. Om toch een oplossing van het l.p. model te kunnen bepalen hebben we de in de volgende paragraaf beschreven procedure toegepast.

De procedure ter aanpassing van de kostprijs

In schema 1 is de procedure geschetst die een juiste kostprijsaanduiding mogelijk maakt. De procedure houdt een terugkoppeling in en omvat meestal enkele iteraties. Een iteratie bestaat uit een kostprijsberekening, het bepalen van de optimale oplosing van een lineair programmeringsmodel en een vergelijking van deze oplossing met de voorgaande. In de eerste iteratie wordt het l.p. model uitgerekend met de laagst mogelijke kostprijzen, d.w.z. per projekt en per transportleiding wordt de grootst mogelijke kapaciteit verondersteld. De aldus verkregen oplossing is basis voor een nieuwe kostprijsberekening. De kostprijzen van de projekten en leidingen die in de oplossing zitten worden indien nodig aangepast aan de berekende kapaciteiten. De andere kostprijzen worden op het oude niveau gehandhaafd. Hierna wordt het l.p. model opnieuw uitgerekend, etc. Het is aannemelijk te maken dat de oplossing konvergeert in een stabiele optimale oplossing.
De procedure wordt beëindigd als de kapaciteiten, verkregen als oplossing van een l.p. berekening, gelijk zijn aan de veronderstelde kapaciteiten bij de kostprijsberekening in de betreffende iteratie.

Uitgaande van de gemaakte veronderstellingen zoals hiervoor beschreven en verder uitgaande van een aantal mogelijke verbindingen tussen de projekten en de regio's, werd de optimale oplossing na een beperkt aantal iteraties bereikt. De l.p.

Schema 1. De aanpasingsprocedure.



berekeningen werden uitgevoerd m.b.v. een standaard komputerprogramma, dat tevens de gevoeligheid van de optimale oplossing aangeeft. Hieruit kan gekonkludeerd worden dat de optimale oplossing vrij stabiel is.

4. Kostprijsberekeningen m.b.v. de uniteiten-methode

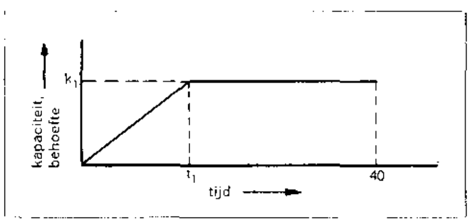
De toerekening van de onderbezettingskosten

In het voorgaande zijn de kostprijzen berekend m.b.v. een jaarlijkse annuïteit, zijnde een jaarlijks gelijk bedrag aan rente en afschrijving tesamen. Hierbij wordt geen rekening gehouden met het feit dat het enige tijd kan duren voordat de maximale kapaciteit bereikt wordt. De onderbezettingsverliezen die in de beginjaren optreden kunnen m.b.v. de uniteiten-methode in de kostprijs gebracht worden [5, 6].

De uniteiten-methode

De uniteiten-methode werkt met het begrip uniteit, zijnde het bedrag aan kapttaallasten (rente + aflossing) dat toegerekend moet worden aan elke geproduceerde eenheid (= m^3 drink- en industriewater) over de gehele looptijd van het projekt. Zie appendix 2. Er bestaat een direkt verband tussen het jaarlijkse produktievolume en de hoogte van de in rekening te brengen jaarlijkse kapitaallasten. Het verschil in kapitaallasten tussen de uniteiten-methode en een niet op het produktievolume gebaseerde afschrijvingsmethode (b.v. annuïteiten-methode), wordt de uitgestelde kosten genoemd. Dit zijn de kosten die naar de later te produceren eenheden worden verschoven (zie het gearceerde deel in afb. 3).

Indien de kostprijzen en tarieven gebaseerd worden op de uniteiten-methode zullen in de beginjaren van het projekt exploitatietekorten optreden, als gevolg van de eerst in de toekomst te innen uitgestelde kosten. De financiering van grote waterwinprojekten zal dan ook niet zonder problemen zijn.



Afb. 4 - De drinkwaterbehoefte.

De invloed van op vollooptijd op de uniteit

Onder de vollooptijd (t_1) verstaan we de tijd die verloopt tussen het starten van de installatie en het moment waarop de maximale kapaciteit wordt bereikt (zie afb. 4).
We veronderstellen een lineaire toename van de behoefte. Bij een maximale kapaciteit van 5.10^6 m^3 (= k_1) is de uniteit bepaald bij een toenemende vollooptijd. Zie tabel I en afb. 5.
De initiële investering bedraagt 5.10^6 gld. met een afschrijvingstermijn van 40 jaar.

TABEL I - *Verband tussen de vollooptijd en uniteit.*

vollooptijd (jr)	1	5	10	15	20	25	30	35	40
uniteit (ct)	8,4	9,8	11,8	14,0	16,4	19,2	22,2	25,4	28,9

De uniteit bij een vollooptijd van 1 jaar is gelijk aan de annuïteit. De overkapaciteit is het grootst bij een vollooptijd van 40 jaar. We kunnen konkluderen dat de overkapaciteit en de daaraan verbonden kosten van grote invloed zijn op de hoogte van de uniteit. De uniteit bij een 10-jarige vollooptijd is 40 % hoger dan de annuïteit. Het is duidelijk dat bij (optimaliserings)berekeningen met de overkapaciteit rekening moet worden gehouden.

5. De fasering van de projekten

Het faseringsprobleem

Bij de formulering van het probleem in hoofdstuk 2, hebben we 3 aspekten onderscheiden.
Het eerste aspekt: de toewijzing van de projekten aan de afnemers en de bepaling van de kapaciteiten van de projekten en van de leidingen in het jaar 2000, hebben we behandeld in hoofdstuk 2. Bij de bepaling van de starttijdstippen, het tweede aspekt, is voorlopig uitgegaan van de volgende veronderstellingen:

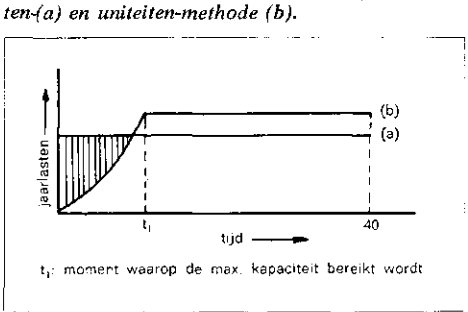
- eerst wordt per regio de maximaal toelaatbare hoeveelheid winbaar grondwater gewonnen;
- per afnemer wordt die transportleiding het eerst in gebruik genomen waarvoor het totaal aan produktie- en transportkosten minimaal is.

Uit de starttijdstippen van de leidingen volgen direkt die van de waterwinprojekten.
In eerste instantie hebben we het vraagstuk integraal voor alle projekten en leidingen trachten op te lossen met behulp van de wiskundige optimaliseringsmethode van gemengd-geheeltallige lineaire programmering [7].
Hoewel de formulering gegeven kon worden, was het niet mogelijk het model op te lossen. De oplossingsruimte bleek veel te groot en de verwerking op een komputer op dit ogenblik niet mogelijk. Daarom zijn we van een integrale aanpak afgestapt en gaan kijken naar de fasering van de afzonderlijke projekten en leidingen. In een later stadium worden zij aan elkaar gekoppeld.

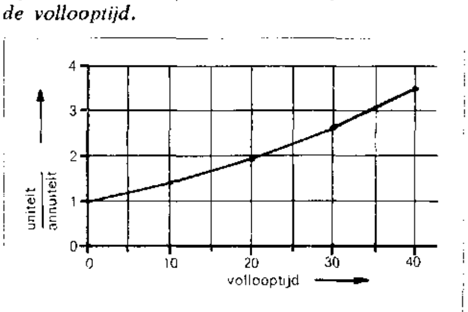
De investering in 2 fasen

In tabel I hebben we gezien dat bij een investering van f 5.10^6 (kapaciteit 5.10^6 m^3) een uniteit hoort van 28,9 ct/m^3 indien de maximale kapaciteit in 40 jaar bereikt bereikt wordt. Wat gebeurt er nu met de kostprijs indien het projekt niet ineens gelegd wordt maar in 2 fasen van gelijke grootte (zie afb. 6).
Als het projekt in 2 fasen van gelijke grootte wordt uitgevoerd zal de gemiddele investering per m^3 van de eerste en tweede uitbreiding hoger zijn dan 1 gld/m^3, zijnde de investering per eenheid bij bouwen ineens. We definiëren:

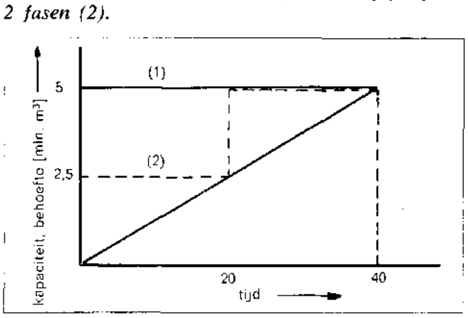
Afb. 3 - De jaarlijkse kapitaallasten bij annuïteiten-(a) en uniteiten-methode (b).



Afb. 5 - De uniteit/de annuïteit als funktie van de vollooptijd.



Afb. 6 - Kapaciteitsuitbreiding ineens (1) of in 2 fasen (2).



$$\alpha = \frac{\text{investering van 2 kleine eenheden op moment 0}}{\text{investering grote eenheid op moment 0}}$$

$(\alpha > 1)$

$$\beta = \frac{\text{investering kleine eenheid op moment 20}}{\text{investering kleine eenheid op moment 0}}$$

In α komt het schaaleffekt tot uiting d.w.z. dat de investering van 2 kleine eenheden van 2,5 . 10^6 m^3 groter is dan de investering behorende bij één grote eenheid van 5.10^6 m^3.
De variabele β geeft aan in welke mate het investeringsgoed relatief in prijs gestegen is t.o.v. het beslissingstijdstip. Bij een diskonteringsvoet van 8 % komen we dan m.b.v. de uniteitenmethode tot het verband gegeven in afb. 7.
Hieruit valt b.v. af te lezen dat, zelfs indien de investering van de eerste fase 1,5 keer zo groot is als de helft van de grote investering (α = 1,5) en indien de investering van de 2e fase na 20 jaar 1,5 keer zo groot is als de investering van de eerste fase (β = 1,5), de uniteit van 25,7 ct/m^3 kleiner is dan de uniteit van 28,9 ct/m^3, behorende bij bouwen ineens. Verder is te zien dat de hoogte van de 2e investering weinig invloed heeft op de uniteit over 2 fasen. Dit is een gevolg van het diskonteren.

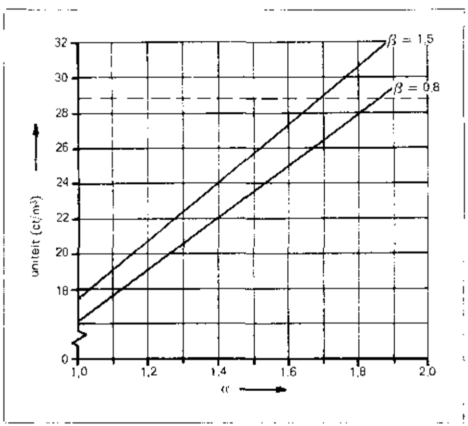
De optimale grootte van de investering

In het voorgaande bleek, bij de aangenomen waarden, het bouwen in 2 fasen voordeliger te zijn dan het bouwen ineens. Wat gebeurt er nu met de uniteiten-kostprijs wanneer we het aantal fasen uitbreiden? Met andere woorden wat is de meest ekonomische grootte van de investering, gegeven het verband tussen de investeringen en de kapaciteit. Bij het bouwen in grote eenheden hebben we de voordelen van het schaaleffekt. Hiertegenover staat echter een grotere overkapaciteit dus hogere onderbezettingsverliezen, omdat het langer duurt voordat de maximale kapaciteit bereikt wordt. Zie ook [8].

In hoofdstuk 3 hebben we gezien op welke wijze voor de verschillende soorten waterwinprojekten de investeringsfunkties kunnen worden bepaald. Hiervan uitgaande en rekening houdende met een opslag van 20 % op het investeringsbedrag voor direktiekosten en bouwrente, kunnen we b.v. de volgende investeringsfunktie opstellen:

$$I = 1{,}20\left\{20 + 4{,}75\left(\frac{KAP}{10^6}\right)^{0{,}7}\right\}.10^6 \text{ [gld]}$$

Uitgaande van deze investeringsfunktie

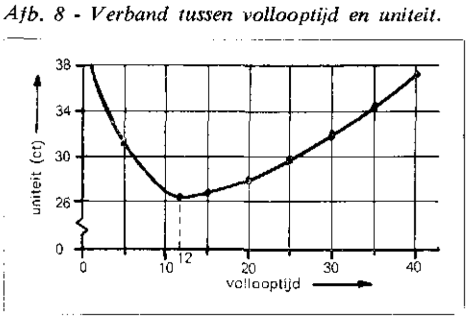


Afb. 7 - Verband tussen uniteit over 2 fasen en α en β.

en een behoeftetoename van 5.10^6 m^3 per jaar is de uniteit als funktie van de vollooptijd bepaald (zie afb. 8).

De laagste uniteit, 26,2 ct, wordt bereikt bij een volllooptijd van 12 jaar, d.w.z. dat we de maximale kapaciteit van het projekt moeten stellen op een behoeftetoename van 12 jaar. Hierbij hoort een kapaciteit van 60.10^6 m^3. Veronderstellen we dat de behoeftetoename per jaar niet verandert dan wordt het projekt iedere 12 jaar herhaald (deze uitkomst is niet te vergelijken met de cijfers in het vorige hoofdstuk omtrent de investering in 2 fasen, dit als gevolg van een aldaar gehanteerde fiktieve investeringsgrootte).
In afb. 8 is verder te zien dat, indien in de praktijk omwille van andere dan ekonomische redenen afgeweken wordt van de optimale grootte, het verschil in uniteit binnen een grote range vrij klein is.
Voor de transportleidingen kan op soortgelijke wijze als aangegeven voor de projekten, mede rekening houdend met de energiekosten, een optimale vollooptijd bepaald worden.

Afb. 8 - Verband tussen vollooptijd en uniteit.



De invloed van de vorm van de investeringsfunktie op de optimale vollooptijd en de bijbehorende uniteit

De exponent in de investeringsfunktie (de konstante b van de funktie in hoofdstuk 3) geeft het schaaleffekt aan, d.w.z. in welke mate de gemiddelde investering per eenheid kapaciteit afneemt bij toenemende maximale kapaciteit. Tabel II laat zien dat bij oplopende b, dus afnemend voordeel van schaalvergroting, de optimale vollooptijd afneemt, bij konstante behoeftetoename per jaar (tabel II wordt per rij gelezen). Wanneer de behoeftetoename per jaar van de aangesloten regio's groter wordt, neemt de optimale vollooptijd van het projekt af (de tabel wordt kolomsgewijze gelezen).

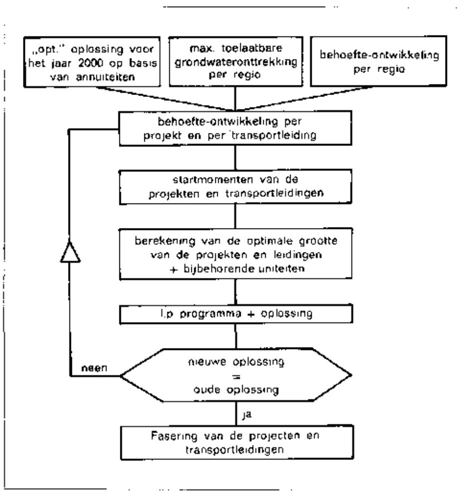
Een verandering van de faktor 4,75 in de investeringsfunktie heeft geen invloed op de optimale vollooptijd. Alleen de hoogte van de investering en dus ook de uniteit wordt erdoor bepaald.
Een verhoging van de vaste kosten (in het voorbeeld *f* 20.10^6) doet de optimale vollooptijd toenemen. De mate van toename is afhankelijk van de afname van de gemiddelde investering per eenheid kapaciteit. Indien we een investeringsfunktie hebben die door de oorsprong gaat, dus niet toepasbaar voor kleine kapaciteiten, is de optimale vollooptijd alleen afhankelijk van de hoogte van de exponent en niet van de behoeftetoename per jaar.

6. De bepaling van de optimale oplossing van het landelijke model

In het voorgaande zagen we op welke wijze per projekt en per transportleiding de optimale vollooptijd met bijbehorende uniteit is te berekenen. In deze paragraaf worden deze individuele projekten en leidingen aan elkaar gekoppeld.
De procedure is geschetst in schema 2. Door uit te gaan van de optimale l.p. oplossing op basis van annuïteitenkostprijzen (de optimale oplossing van het toewijzingsprobleem), de maximaal

TABEL II - *De invloed van de grootte van de exponent en de behoeftetoename per jaar op de optimale vollooptijd.*

Behoeftetoename per jaar . $10^6 m^3$	exponent = 0,60		exponent = 0,70		exponent = 0,80	
	uniteit (ct)	vollooptijd (jr)	uniteit (ct)	vollooptijd (jr)	uniteit (ct)	vollooptijd (jr)
1,25	41,9	20	51,1	16	62,1	13
2,50	27,5	18	35,9	14	46,4	11
3,75	21,9	17	29,7	13	40,9	10
5,00	18,7	16	26,2	12	36,3	9



Schema 2. De gevolgde procedure.

toelaatbare grondwateronttrekkingen per regio en de drinkwaterbehoefte per regio wordt de behoefte-ontwikkeling per projekt en per transportleiding in de tijd berekend. Door de lage kostprijs van het grondwater in vergelijking met gezuiverd oppervlaktewater wordt allereerst het grondwater zoveel mogelijk gebruikt. Indien de drinkwaterbehoefte groter wordt dan de maximaal toelaatbare grondwateronttrekking moet een projekt met bijbehorende transportleiding geïnstalleerd worden. De keuze is gemaakt m.b.v. het l.p. programma. Voor de verschillende projekten en transportleidingen is de investeringsfunktie bepaald. Hiervan uitgaande en van de berekende behoefte-ontwikkeling wordt van elk projekt en van elke gebruikte transportleiding die in de optimale oplossing aanwezig zijnde optimale grootte met bijbehorende uniteit berekend. De kostprijzen van de niet gebruikte projekten en leidingen worden op het oude niveau gehandhaafd (annuïteiten-prijzen).
We gaan aldus uit van de laagst mogelijke kostprijzen en alleen de kostprijzen van de projekten die in de oplossing zitten worden aangepast. Met de gewijzigde kostprijzen wordt m.b.v. het l.p. programma een nieuwe oplossing berekend. De procedure wordt beëindigd indien twee opeenvolgende oplossingen aan elkaar gelijk zijn. We hopen dat de oplossing konvergeert in een optimale oplossing. Hieruit kan de fasering van de gebruikte projekten en transportleidingen d.w.z. de startmomenten en de optimale begingrootten worden afgeleid.
Bij het uitvoeren van de berekeningen werd na een beperkt aantal iteraties de optimale oplossing bereikt. Aan de hand van deze oplossing kunnen, bij de door ons aangehouden parameters en uitgangspunten, de volgende konklusies getrokken worden:

— de projekten kunnen optimaal gefaseerd worden met een periode van 10 - 11 jaar;
— de gemiddelde kostprijs van de projekten en van de leidingen is bij doorberekening van de overkapaciteit en bij optimale fasering 55 % hoger dan de gemiddelde annuïteitenprijs;
— de bereikte oplossing is vrij stabiel, d.w.z. een kleine wijziging van de kostprijs verandert niet direkt de optimale oplossing;
— de integrale oplossing is onder te verdelen in verschillende regionale deeloplossingen die elkaar slechts weinig beïnvloeden.

De methode voor de bepaling van de optimale grootte van de projekten en van de leidingen kan alleen bij een lineaire behoeftefunktie toegepast worden.
Wanneer de funktie niet-lineair is en b.v. een exponentieel of sprongsgewijs verloop heeft, kan met behulp van de wiskundige optimaliseringsmethode van dynamische programmering [7] de fasering van de individuele projekten en leidingen bepaald worden.
Indien een behoeftegebied tijdelijk op een onderbezet projekt wordt aangesloten kan de overkapaciteit van dat projekt aanmerkelijk gereduceerd worden. De hieruit volgende voordelen kunnen worden afgewogen tegen de extra kosten van een transportleiding die tijdelijk wordt gebruikt. Aansluitende berekeningen tonen aan dat zeker binnen een regio hiermee rekening moet worden gehouden.
Bij de bepaling van de optimale oplossing voor het jaar 2000 en de weg ernaar toe wordt uitgegaan van enkele veronderstellingen. Zo zal voor het onderzoeken van alternatieven binnen een bepaalde regio zeker van een gedetailleerder behoefteraster moeten worden uitgegaan. Ook zal de veronderstelling dat ieder behoeftegebied rechtstreeks op een projekt aangesloten wordt, moeten worden verlaten, d.w.z. mogelijkheden van doorkoppeling van leidingen moeten worden bezien.

7. Samenvatting en konklusies

Om te kunnen komen tot het opstellen van alternatieven, c.q. het kunnen nemen van een beslissing, omtrent de toekomstig te installeren werken van winning, zuivering, opslag en transport is een ekonomisch model ontwikkeld. Dit model poogt antwoord te kunnen geven op de vraag: waar, wanneer, hoeveel en voor wie moet er produktie- en transportkapaciteit geïnstalleerd worden zodanig dat de produktie- en transportkosten, rekening houend met een tijdelijke overkapaciteit, minimaal zijn. We onderscheiden hier een toewijzings- en een faseringsprobleem. Het eerste omvat de vraag welk waterwinprojekt levert aan welk gebied.
Uitgegaan is van 25 in het struktuurschema als mogelijk aangegeven projekten. Nederland is opgedeeld in 20 regio's, waarvan de drink- en industriewaterbehoefte bekend verondersteld wordt. Het faseringsprobleem omvat het aangeven van de kapaciteit in de tijd, per projekt en per leiding.

Uitgaande van de door ons gehanteerde parameters en veronderstellingen komen we tot de volgende konklusies:

— De overkapaciteit c.q. de onderbezettingsverliezen zijn van grote invloed op de kostprijs.
— De modeloplossing voor het toewijzings- en faseringsvraagstuk is vrij stabiel.
— In bovenstaand model worden de projekten gefaseerd met een periode van 10 - 11 jaar. Gevoeligheidsanalyse wijst uit dat een kleine afwijking hiervan weinig invloed heeft op de optimale oplossing.
— Nu het landelijk model enige vorm gekregen heeft, is het zinvol gedetailleerdere modellen te ontwikkelen op regionaal niveau. Deze regionale oplossingen dienen getoetst te worden binnen een landelijk model.

Appendix 1. Het lineaire programmeringsmodel

Er zijn n drinkwaterleveranciers L_i $(i = , \ldots , n)$ met een maximale capaciteit C_i en er zijn m afnemers A_j $(j = 1, \ldots , m)$ met een behoefte B_j.
Minimaliseer het totaal van produktie- en transportkosten:

$$\sum_{i=1}^{n} f_i\ (x_i) + \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} f_{ij}\ (x_{ij})$$

onder de voorwaarden:

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ij} = B_j \qquad (j = 1, \ldots , m) \text{ behoefterestrikties}$$

$$\sum_{j=1}^{m} x_{ij} \leq C_i \qquad (i = 1, \ldots , n) \text{ kapaciteitsrestrikties}$$

$$x_i = \sum_{j=1}^{m} x_{ij}$$

$$x_i \geq o$$

$$x_{ij} \geq o$$

waarbij

x_{ij} = de hoeveelheid drinkwater die van L_i naar A_j getransporteerd wordt

x_i = de totale hoeveelheid drinkwater die in L_i geproduceerd wordt

$f_{ij}\ (x_{ij})$ = de kosten om x_{ij} eenheden water van L_i naar A_j te transporteren
$f_i\ (x_i)$ = de kosten om x_i eenheden water in L_i te produceren

Appendix 2. De uniteiten-methode

Om deze methode in een wiskundige notatie om te kunnen zetten, definiëren we de volgende variabelen:

I_0 : investering op tijdstip o (= beslissingstijdstip)
R : restwaarde na n perioden
u : uniteit per m^3 drinkwater
A_t: af te leveren hoeveelheden drinkwater in jaar t
r : rente-tarief (= disconteringsfactor)
n : de afschrijvingstermijn

Gebruikmakend van deze gegevens kunnen we de volgende formule opstellen:

$$I_0 - \frac{R}{(1+r)^n} = u\left\{\frac{A_1}{1+r} + \frac{A_2}{(1+r)^2} + \ldots\ldots + \frac{A_n}{(1+r)^n}\right\}$$

in woorden: investering minus kontante restwaarde is gelijk aan de kontante afzet maal uniteit.

Hieruit kunnen we de uniteit u oplossen:

$$u = \frac{I_0 - \dfrac{R}{(1+r)^n}}{\dfrac{A_1}{1+r} + \dfrac{A_2}{(1+r)^2} + \ldots + \dfrac{A_n}{(1+r)^n}} = \frac{\text{kontante waarde investering}}{\text{kontante afzet}}$$

Literatuur

1. RID *Ontwerp Structuurschema Drink- en Industriewatervoorziening*, juli 1972.
2. Santema, P. *Quo Vadis*, H_2O (6) 1973, nr. 11; 261.
3. Verkerk, P. J. *Planning; waarom en hoe*, H_2O (6) 1973, nr. 11; 263.
4. Vankan, G. en Werner, H. *Toepassing van lineaire programmering bij het ontwerpen van basisplannen voor de toekomstige drink- en industriewatervoorziening in Nederland* (intern RID-rapport), sept. 1972.
5. Schroeff, H. J. van der. *Kosten en kostprijs*, deel 1 en 2, Kosmos, 1970.
6. VEWIN. *Kostprijsberekeningen en tariefstelling bij en-gros leveringen*, sept. 1972.
7. Wagner, H. M. *Principles of operational research*, Prentice Hall, 1969.
8. Karpe, H. J. *Zur Wirtschaftlichkeit bei der Planung von Fernwasserversorgungen* (dissertatie), Karlsruhe, 1969.