

# Hydraulische en economische analyse van het effect van dagaccumulatie bij transport van water over grote afstanden

## 1. Inleiding

Om redenen van waterkwaliteit dient de drinkwatervoorziening van een verbruikscentrum soms te geschieden vanaf een locatie, die vele kilometers van het voorzieningsgebied is gelegen. Ook in geval het voorzieningsgebied deel uitmaakt van een streekwaterleidingbedrijf met centraal geregelde productie moet het drinkwater over soms grote afstanden getransporteerd worden.

De vraag in het voorzieningsgebied is ongelijkmatig en varieert per uur, per dag,



IR. N. A. AMESZ  
IWACO BV  
Rotterdam

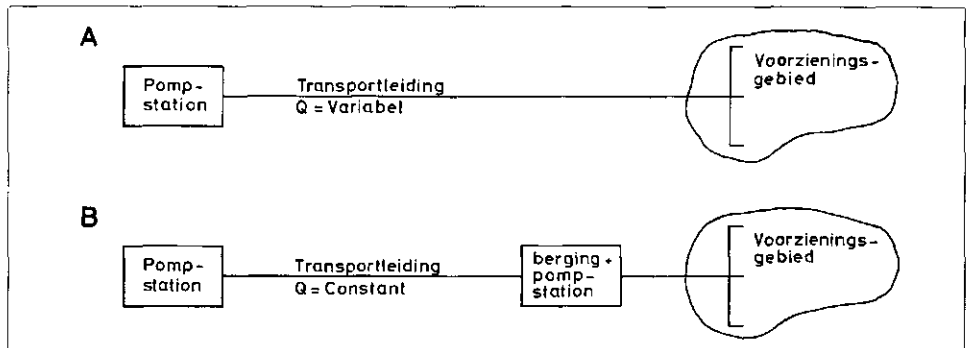
per week en per seizoen. Door toename van bevolking en waterbeschaving is er ook sprake van een toenemende gemiddelde afzet. De ongelijkmatige afname wordt (bij oppervlaktewater zuiveringsbedrijven) doorgaans afgevlakt met behulp van reservoirs (dag- of week-accumulatie); dit in verband met o.a. de eisen die gesteld worden vanuit het zuiveringsproces. Bij grondwater is het zuiveringsproces vaak eenvoudiger (of soms vindt er helemaal geen behandeling plaats) en kan de ongelijkmatigheid in de afname afgevlakt worden door het bij- of afschakelen van een aantal pompputten en is derhalve geen berging vereist uit het oogpunt van *waterzuivering*.

In het laatstgenoemde geval kan uit het oogpunt van *watertransport* wel berging verantwoord zijn. In dit artikel is getracht een berekeningsmethode op te stellen op grond waarvan men zou kunnen analyseren bij welke transportafstand het zinvol is om berging (dagaccumulatie) te introduceren. Het probleem is ontleend aan een buitenlands watervoorzieningsproject van IWACO, doch de gepresenteerde formules zijn zo algemeen mogelijk gehouden. In laatste instantie zijn (ter illustratie) enkele numerieke voorbeelden uitgewerkt.

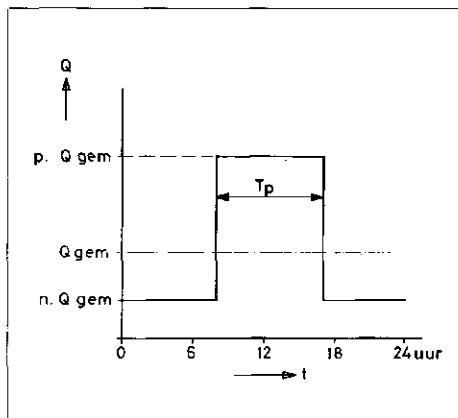
De auteur pretendeert geenszins dat de gepresenteerde formules een nieuwe ontwikkeling op dit gebied voorstellen (zie ook literatuur). Volledigheidshalve echter zijn ze — zij het in beknopte soms afwijkende vorm — wel opgenomen in het artikel.

## 2. Probleemstelling en schematisering

In de bovenste tekening van afb. 1 vindt het watertransport plaats zonder berging. Door de ongelijkmatige afname (afb. 2) vindt er een ongelijkmatig watertransport plaats. In de onderste tekening van afb. 1



Afb. 1 - Schematisering.



Afb. 2 - Verbruikspatroon.

is een berging (+ opjaagstation) aanwezig met een zodanig volume, dat het watertransport gelijkmatig verloopt.

Een vergelijking van beide alternatieven (a en b, afb. 1) is alleen mogelijk indien de leidingdiameter in beide alternatieven economisch optimaal wordt gedicteerd: te weten die diameter waarbij de som van de initiële kosten van de leiding (materiaal + aanleg) plus de geïncapitaliseerde jaarlijkse energiekosten minimaal is. Gezien het feit dat het energieverbruik evenredig is met  $Q^3$  is de optimale diameter in geval a groter dan in geval b. Bij groter wordende transportafstanden zal het verschil in investering en energiekosten tussen beide varianten steeds groter worden, zo groot zelfs dat de aanleg van een berging uit dat verschil kan worden bekostigd. De vraag is dan: bij welke afstand is dat het geval en welke factoren zijn daarop van invloed.

In dit artikel is getracht het probleem te schematiseren en alle factoren die van invloed zijn in een rekenmodel op te nemen. Zulke factoren zijn:

- het gemiddelde debiet en de ongelijkmatigheid;
- eenheidsprijs energie;
- eenheidsprijs leiding;
- eenheidsprijs berging;
- rente en afschrijvingsperiode.

Het rekenmodel is zo algemeen mogelijk

opgezet en uiteindelijk is — met behulp van de computer — een aantal numerieke voorbeelden nader onderzocht.

## 3. Notaties

z	wrijvingsverlies per m' leiding	[—]
v	gemiddelde stroomsnelheid	[m/s]
D	leidingdiameter	[m]
k	wandruwheid	[m]
$\lambda$	wrijvingscoëfficiënt	[—]
$Q_{gem}$	gemiddeld debiet	[m <sup>3</sup> /s]
$Q_{max}$	maximaal debiet	[m <sup>3</sup> /s]
$Q_{min}$	minimaal debiet	[—]
$\eta$	rendement	[—]
L	lengte leiding	[m]
P	vermogen	[kW]
$\rho$	soortelijke massa water	[kg/m <sup>3</sup> ]
g	versnelling zwaartekracht	[m <sup>2</sup> /s]
Tj	aantal uren in een jaar (8760)	[—]
Tp	aantal piekuren per etmaal	[—]
Tn	aantal uren met laag verbruik per etmaal	[—]
T	aantal uren per etmaal (24)	[—]
p	ongelijkmatigheidsfactor	[—]
n	factor voor laag verbruik	[—]
F	factor i.v.m. wisselend debiet	[—]
a, b	konstanten in formule voor leidingkosten	[—]
I	aanlegkosten leiding	[fl/m']
E	jaarlijkse energiekosten	[fl/jr]
$E_c$	kontante waarde energiekosten	[fl]
c	kontante waarde factor	[—]
e	energiekosten per eenheid	[fl/kWh]
K	totale kontante waarde leiding	[fl]
r	diskonto voet	[—]
l	afschrijvingstermijn	[jaar]
V	inhoud berging	[m <sup>3</sup> ]
d	eenheidsprijs berging	[fl/m <sup>3</sup> ]
B	kosten berging (investering)	[fl]

**4. Bepaling optimale leidingdiameters**

De optimale leidingdiameter is die diameter waarbij de som van de kosten van leidingaanleg en de kontante waarde van de energiekosten minimaal is.

De kosten van de leiding is gegeven door

$$I = a + b \cdot D \tag{1}$$

waarbij een lineair verband is verondersteld tussen diameter en kosten.

De jaarlijkse energiekosten kunnen worden berekend met:

$$E = \frac{\rho \cdot g \cdot Q_{gem} \cdot F \cdot z}{1000 \eta} \cdot T_j \cdot e \tag{2}$$

waarin:

$$z = \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \text{ of } \tag{3}$$

$$z = \frac{8 \cdot \lambda \cdot Q_{gem}^2 \cdot F}{g \cdot \pi^2 \cdot D^5} \tag{4}$$

en:

$$\lambda = \frac{1}{4 \left[ \log \frac{3,7 D}{k} \right]^2} \tag{5}$$

en:

$$F = \frac{n^3 \cdot T_n + p^3 \cdot T_p}{T} \tag{6}$$

De konstante waarde kan worden berekend met

$$E_c = c \cdot E \tag{7}$$

waarin:

$$c = \frac{1 - (1 + r)^{-1}}{r} \tag{8}$$

Na substitutie volgt uiteindelijk:

$$E_c = \frac{8 \cdot \rho \cdot \lambda \cdot e \cdot c}{1000 \eta \cdot \pi^2 \cdot D^5} \cdot T_j \cdot Q_{gem}^3 \cdot F \tag{9}$$

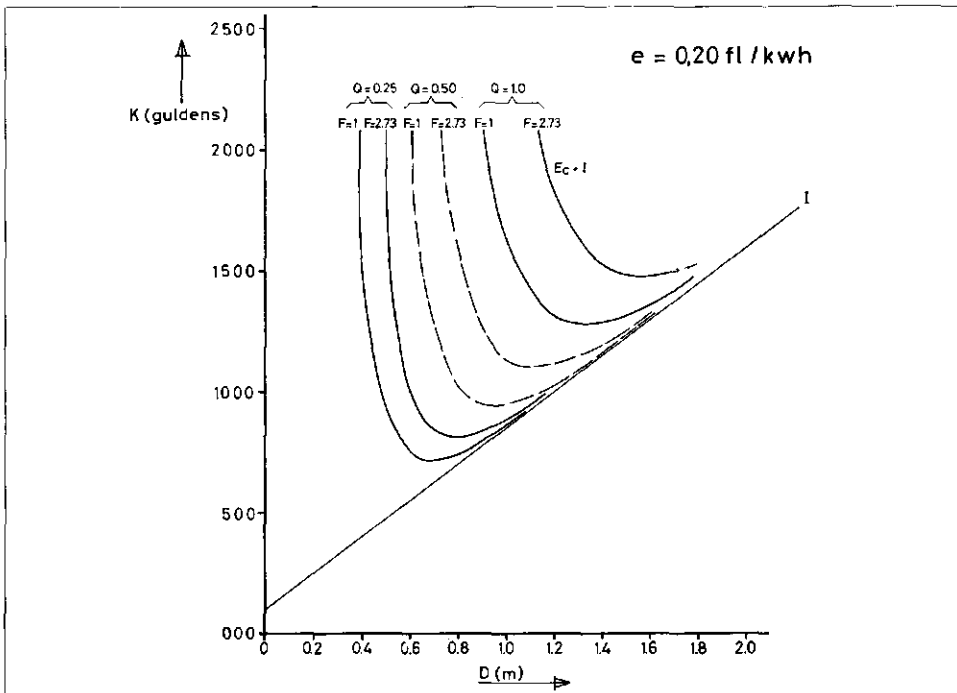
De bovenstaande formules zijn in de vorm van een numeriek voorbeeld uitgewerkt en voorts de resultaten grafisch weergegeven in afb. 3. Als uitgangspunten zijn gekozen:

$Q_{gem} = 0,25 - 0,50$  en  $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$

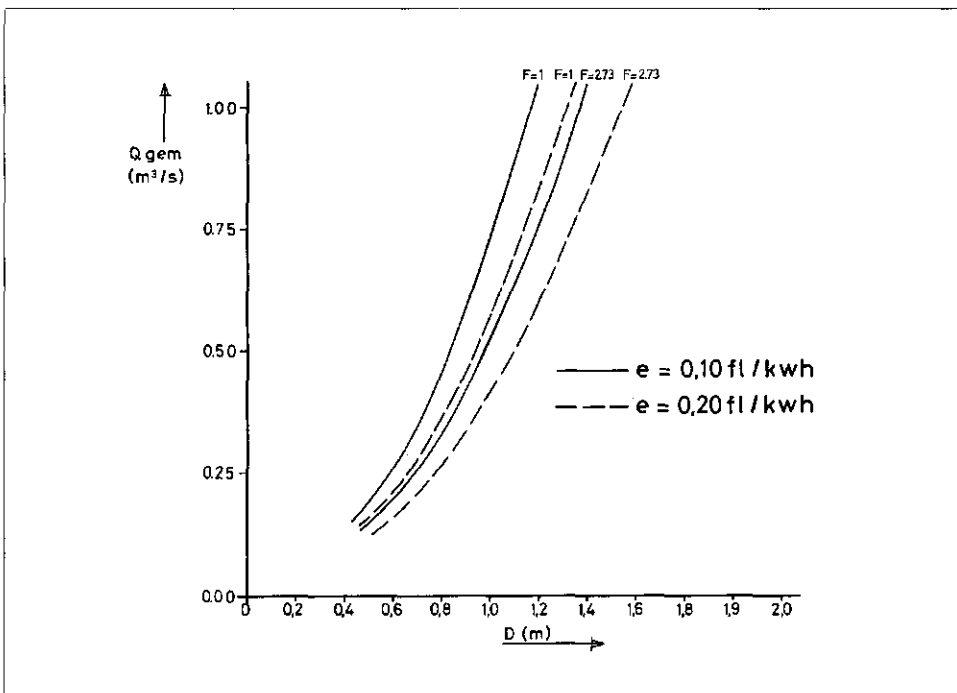
- $p = 2$
- $n = 0,5$
- $e = 0,20 \text{ fl/kWh}$
- $r = 4 \%$
- $l = 40 \text{ jaar } (c = 19,79)$
- $a = 100$
- $b = 750$
- $k = 0,001 \text{ m}$

Door deze aannamen bedraagt in situatie  
a (zonder berging):  $F = 2,73$  en in  
b (met berging):  $F = 1,00$

Voor een aantal leidingdiameters in de reeks  $D = 0,4 - 0,6 - \dots - 1,8 \text{ m}$  kunnen



Afb. 3 - Optimalisering.



Afb. 4 - Verband tussen optimale leidingdiameter en debiet.

$I, E_c$  en  $K = I + E_c$  worden bepaald. Het minimum dat in de krommen ontstaat, kan nader worden bepaald door  $D_{opt.}$  te berekenen uit

$$\frac{dK}{dD} = 0 \tag{10}$$

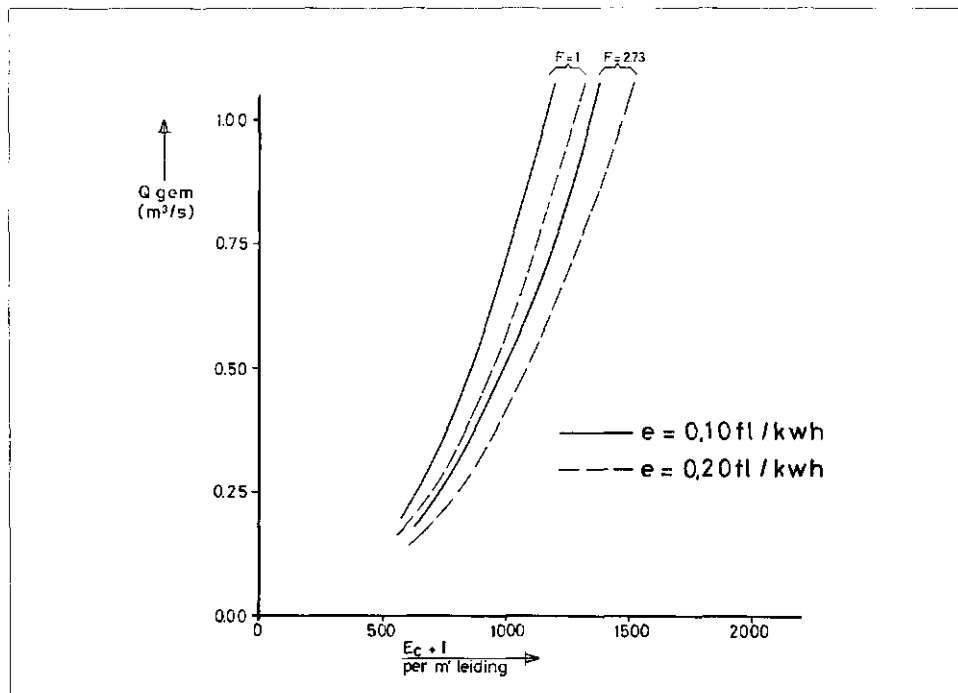
Hetgeen uiteindelijk resulteert in:

$$D_{opt.} = \sqrt[5]{\frac{40 \cdot \rho \cdot \lambda \cdot e \cdot c \cdot T_j \cdot F \cdot Q_{gem}^3}{1000 \eta \cdot \pi^2 \cdot b}} \tag{11}$$

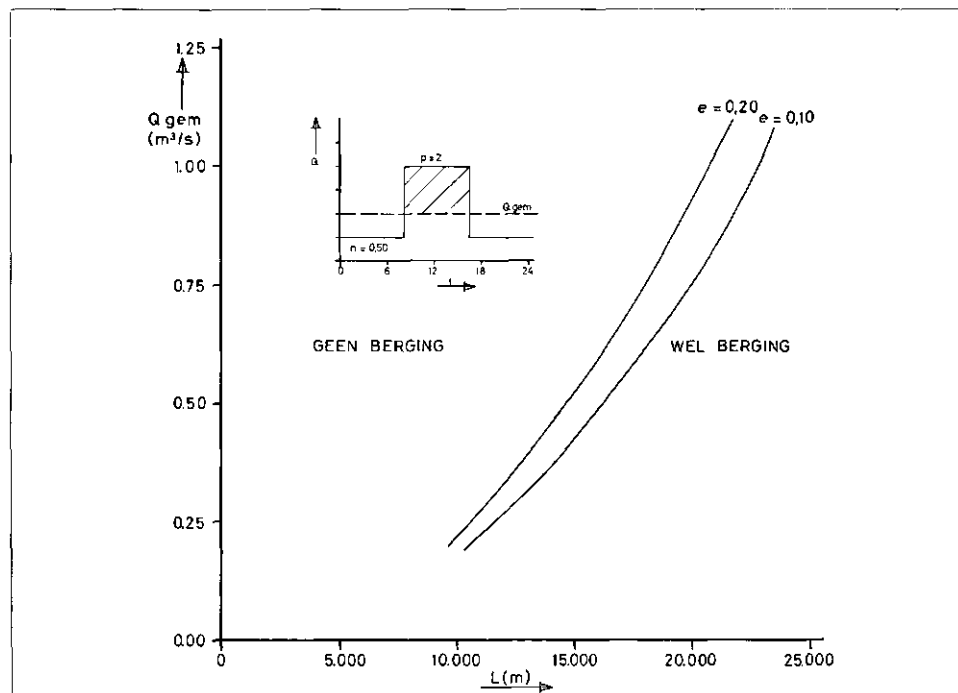
Dit verband tussen  $Q_{gem}$  enerzijds en  $D_{opt.}$  anderzijds is in afb. 4 grafisch weergegeven voor  $e = 0,10$  en  $0,20 \text{ fl/kWh}$  en  $F$  (factor voor wisselend debiet) =  $1,00$  en  $2,73$ .

**5. Effect van berging**

In afb. 5 is het verband weergegeven tussen  $Q_{gem}$  en  $K = E_c + I$  bij  $D_{opt.}$ , zowel voor de wisselende belasting als wel de gelijkmatige belasting. Uit de afbeelding



Afb. 5 - Verband tussen debiet en totale kosten leiding.



Afb. 6 - Numeriek voorbeeld.

blijkt, dat bij  $F = 2,73$  de kosten per  $m'$  leiding duidelijk hoger liggen dan bij  $F = 1,00$  (bijv. voor  $e = 0,20$  fl/kWh en  $Q_{gem} = 1,0$   $m^3/s$  bedraagt het verschil fl. 205,—/ $m'$ ).

De gelijkmatige toevoer  $Q = Q_{gem}$  ( $F = 1$ ) kan worden verwezenlijkt door aanleg van een laagreservoir met opjaagstation.

De inhoud die benodigd is, kan worden bepaald uit:

$$V = Q_{gem} \cdot \frac{T(1-n)}{p-n} \cdot (p-1) \cdot 3600 \quad (12)$$

De kosten van een dergelijk reservoir zijn aangenomen als:

$$B = V \cdot d \quad (13)$$

De transportafstand  $L$  waarboven de konstruktie van een berging economisch verantwoord is, kan nu berekend worden uit:

$$[K_{leiding F=2,73} - K_{leiding F=1}] \cdot L = V \cdot d \quad (14)$$

Het resultaat is grafisch weergegeven in afb. 6.

### 6. Conclusies

Uit de berekeningen blijkt, dat onder aanname van een aantal eenheidsprijzen ten aanzien van energie, leidingaanleg en berging en voorts onder aanname van een geschematiseerd afname patroon een transportafstand is te berekenen waarboven het economisch verantwoord is een berging met dagaccumulatie in te richten. Uit een getal-voorbeeld, waarbij een ongelijkmatigheidsfactor  $p = 2$  is aangenomen, een reële rentevoet van 4 %, een afschrijvingsperiode van 40 jaar en energiekosten ter grootte van 0,20 fl/kWh, blijkt dat deze afstand sterk afhankelijk is van het te transporteren debiet. Uit afb. 6 blijkt dat bij  $Q_{gem} = 0,25$   $m^3/s$  deze afstand ca. 10 km bedraagt en bij  $Q_{gem} = 1,0$   $m^3/s$  ca. 22 km.

In de berekeningen is geen rekening gehouden met een toenemende afzet van water; uit de berekeningen (zie ook afb. 3) kan wél worden gekonkludeerd dat een te klein dimensioneren van een leidingdiameter al snel resulteert in zeer hoge energielasten.

### Literatuur

1. Huisman, prof. ir. L., *Drinkwater*, TH Delft 1976.
2. Wijntjes, ir. W. C., *Berekening en ontwerp van een distributienet in een stadswijk*, H<sub>2</sub>O (3) 1972, nr. 12.
3. Huisman, prof. ir. L., *Stromingsweerstand in leidingen*, KIWA-Meded. nr. 14.
4. Haijken, ir. J., *De meest economische diameter*, H<sub>2</sub>O nr. 17, 1974, blz. 357.

