

ONTWERPNORMEN EN KOSTEN VAN OVERDIMENSIONERING VAN OPEN WATERLOPEN

dr. J. Wesseling

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatiemiddelen, dus geen officiële publikaties.

Hun inhoud varieert sterk en kan zowel betrekking hebben op een eenvoudige weergave van cijferreeksen, als op een concluderende discussie van onderzoeksresultaten. In de meeste gevallen zullen de conclusies echter van voorlopige aard zijn omdat het onderzoek nog niet is afgesloten.

Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut in aanmerking.

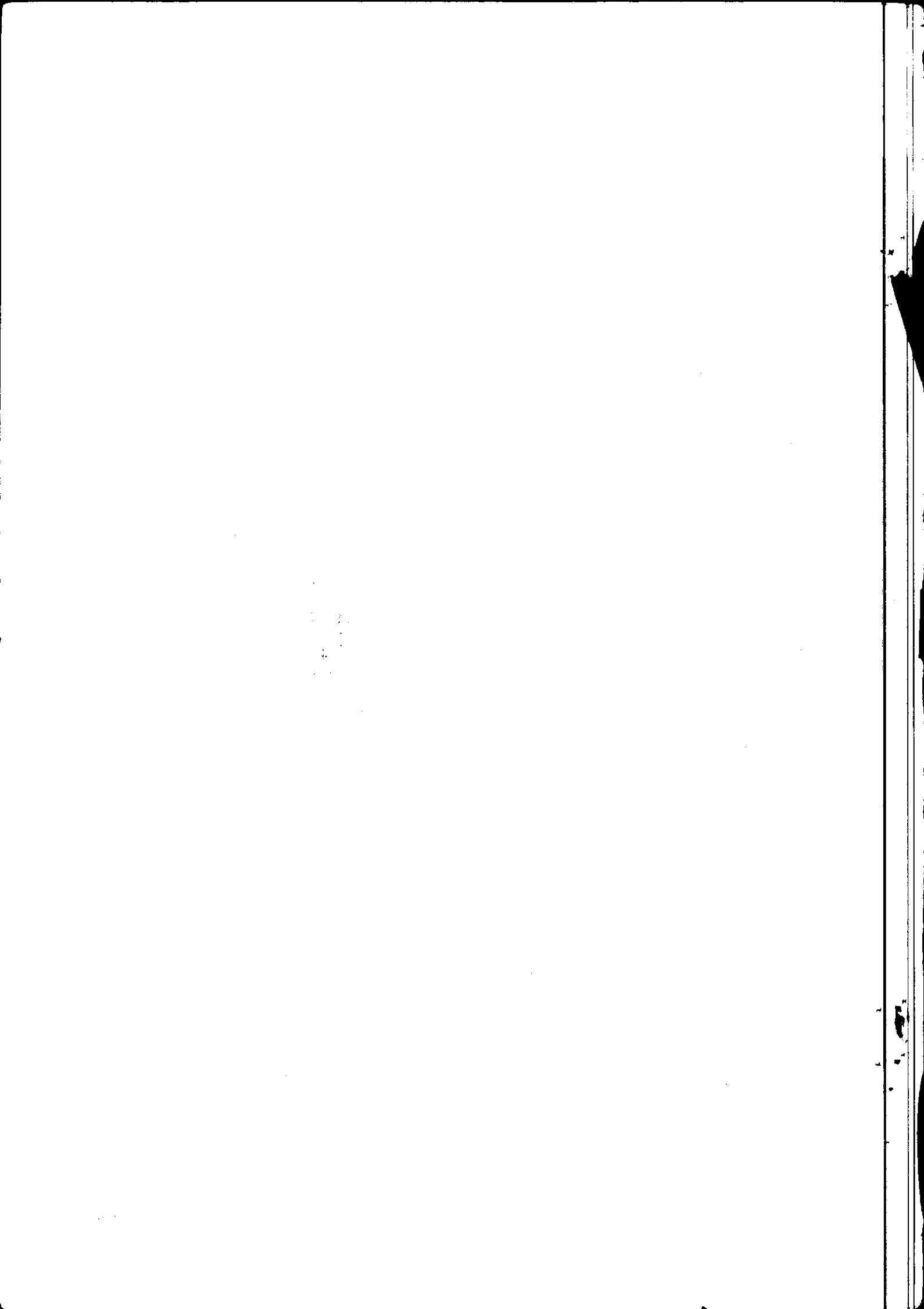
CENTRALE LANDBOUWCATALOGUS



0000 0065 3861

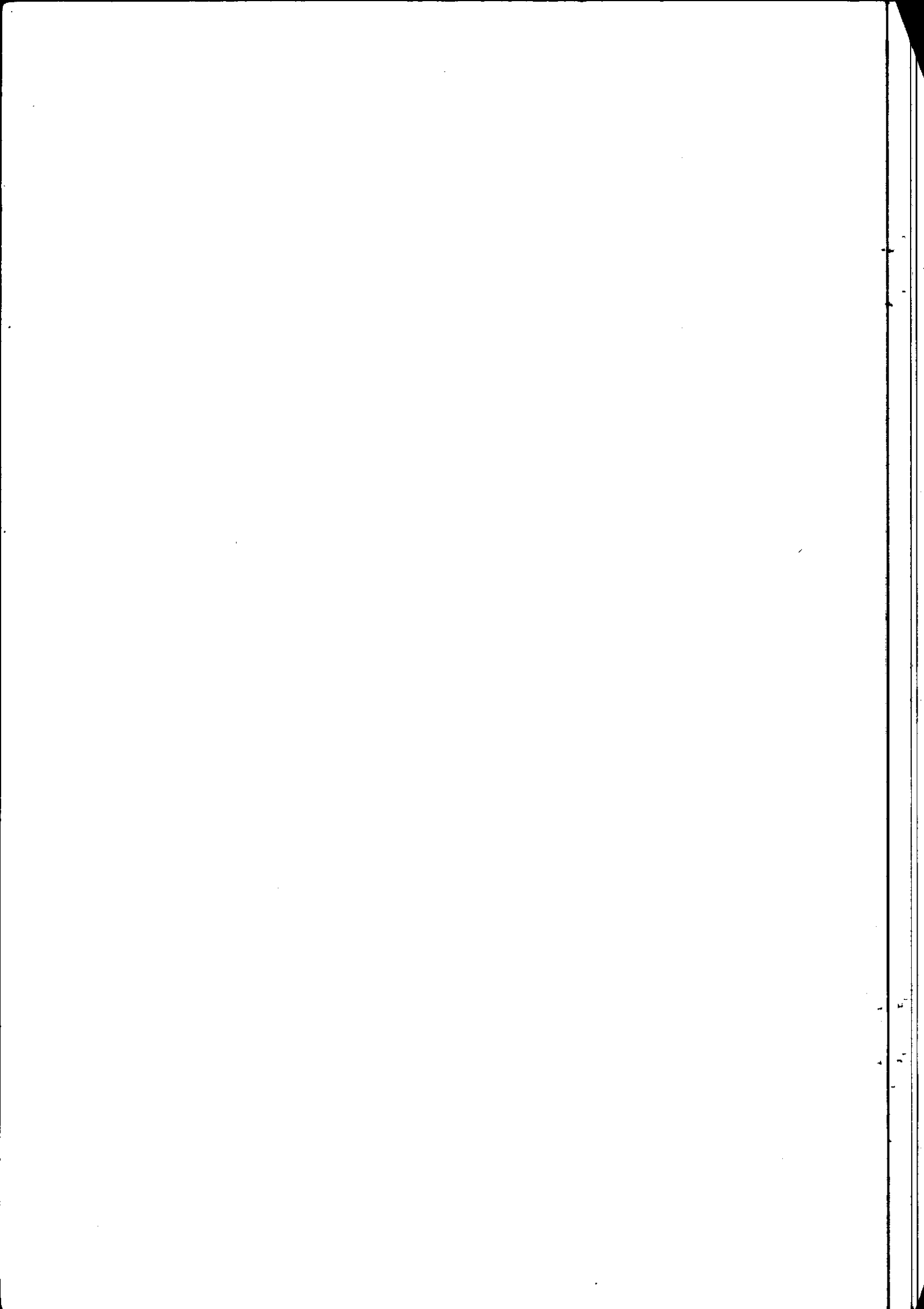
24 DEC. 1982

JSM 175 183-02



I N H O U D

	blz.
INLEIDING	1
THEORETISCHE GRONDSLAGEN	2
HALVE MAATGEVENDE AFVOER	6
OVERDIMENSIONERING	8
KOSTEN VAN OVERDIMENSIONERING	13
DISCUSSIE	16
LITERATUUR	16



INLEIDING

Bij het ontwerpen van open waterleidingen worden bepaalde criteria gehanteerd te weten:

- de afvoerfactor, dat wil zeggen de afvoer die gemiddeld één maal per jaar wordt bereikt of overschreden;
- de droogleggingsnorm, waaruit het toegelaten waterpeil volgt bij de ontwerpafvoer (HW-lijn).

Hiernaast wordt rekening gehouden met een zekere maximum stroomsnelheid die niet mag worden overschreden en die afhankelijk is van de grondsoort. Het desbetreffende voorschrift (WERKGROEP WATERLOPEN, 1958) laat zich er niet over uit of de opgegeven maxima gelden voor de ontwerpafvoer of dat dit snelheden zijn waarbij gevaar voor erosie optreedt.

De laatste jaren wordt bij het ontwerp ook vaak de situatie doorerekend bij de helft van de maatgevende afvoer. Bij deze afvoeren die gemiddeld zo'n 15 maal per jaar worden bereikt of overschreden wordt gesteld dat het waterpeil (NW-lijn) zodanig moet zijn dat de ontwatering van de aanliggende gronden mogelijk is. De NW-lijn zou dan beneden het niveau van de landbouw (buizen-)drainage moeten liggen.

In discussies over onderhoud van open waterlopen staan twee vraagpunten centraal, te weten:

- Geeft het criterium van de halve maatgevende afvoer wel een profiel dat even groot is als dat wordt berekend op grond van de maatgevende afvoer?
- Kan door verzwaring van de criteria een vergroting van profielen worden verkregen, zodat op het jaarlijks onderhoud kan worden bezuinigd?

De bedoeling van deze nota is een antwoord te geven op deze vraag-

punten. Daartoe wordt eerst ingegaan op de in de praktijk toegepaste wiskundige formules. Deze worden op een zodanige wijze samengevat dat ze geschikt zijn om een antwoord op bovengenoemde vragen te geven. Vervolgens wordt een bespreking van de bereikte resultaten gegeven.

THEORETISCHE GRONDSLAGEN

Een open waterleiding wordt gekenmerkt door een aantal grootheden die zijn weergegeven in fig. 1. Dit zijn:

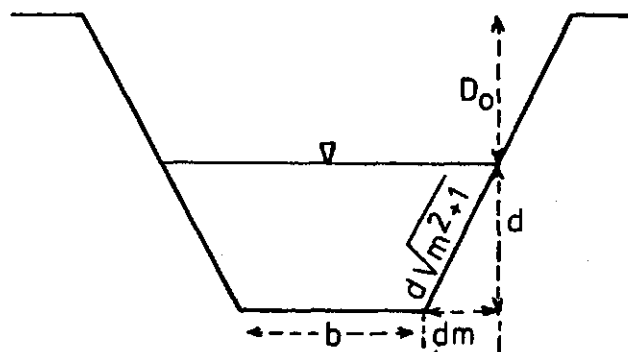


Fig. 1. Kenmerken open waterlopen

D = drooglegging = waterstand beneden maaiveld

d = waterdiepte

b = bodembreedte

m = taludhelling

Tenzij anders aangegeven worden alle lengtematen gegeven in meters.

Bij het ontwerp van waterlopen wordt gebruik gemaakt van de formule van Manning, die luidt:

$$Q = A \cdot v = A \cdot k_M R^{2/3} S^{1/2} \quad (1)$$

waarin Q = het debiet (m^3/s)

A = natte doorsnede = oppervlakte beneden de waterspiegel (m^2)

R = hydraulische straal (m)

S = gradient van de waterspiegel (m/m)

k_M = ruwheidsfactor van de leiding ($m^{1/3} \cdot s^{-1}$)

De hydraulische straal R wordt gedefinieerd als:

$$R = \frac{A}{O} \quad (2)$$

waarin O de natte omtrek is.

Voor trapeziumvormige leidingen als weergegeven in fig. 1 geldt:

$$A = d(b + dm) \quad (3)$$

$$O = b + 2d\sqrt{m^2 + 1} \quad (4)$$

zodat

$$R = \frac{d(b + dm)}{b + 2d\sqrt{m^2 + 1}} \quad (5)$$

Teneinde rekening te kunnen houden met het verband tussen k_M en de waterdiepte wordt hiervoor gebruikt (zie BOS en BIJKERK, 1963):

$$k_M = 33.79 d^{1/3} \quad (6)$$

Invullen van 3, 5 en 6 in 1 geeft dan:

$$\frac{Q}{S^{1/2}} = 33.79 \frac{d^2(b + md)^{5/3}}{(b + 2d\sqrt{m^2 + 1})^{2/3}} \quad (7)$$

Deze formule is niet erg geschikt om mee te werken. Door Bakhmeteff (zie LELIAVSKY, 1965 p. 208 e.v.; BLAUW, 1961) wordt echter gesteld dat voor een open leiding de volgende 'conveyance function' (= transportfunctie) geldt:

$$\frac{Q}{S^{1/2}} = a d^n \quad (8)$$

waarin d de waterdiepte is en a en b constanten. Verg. 8 geeft aan dat bij uitzetten van $Q/S^{1/2}$ tegen de waterdiepte d op dubbel logaritmische schalen een rechte lijn ontstaat.

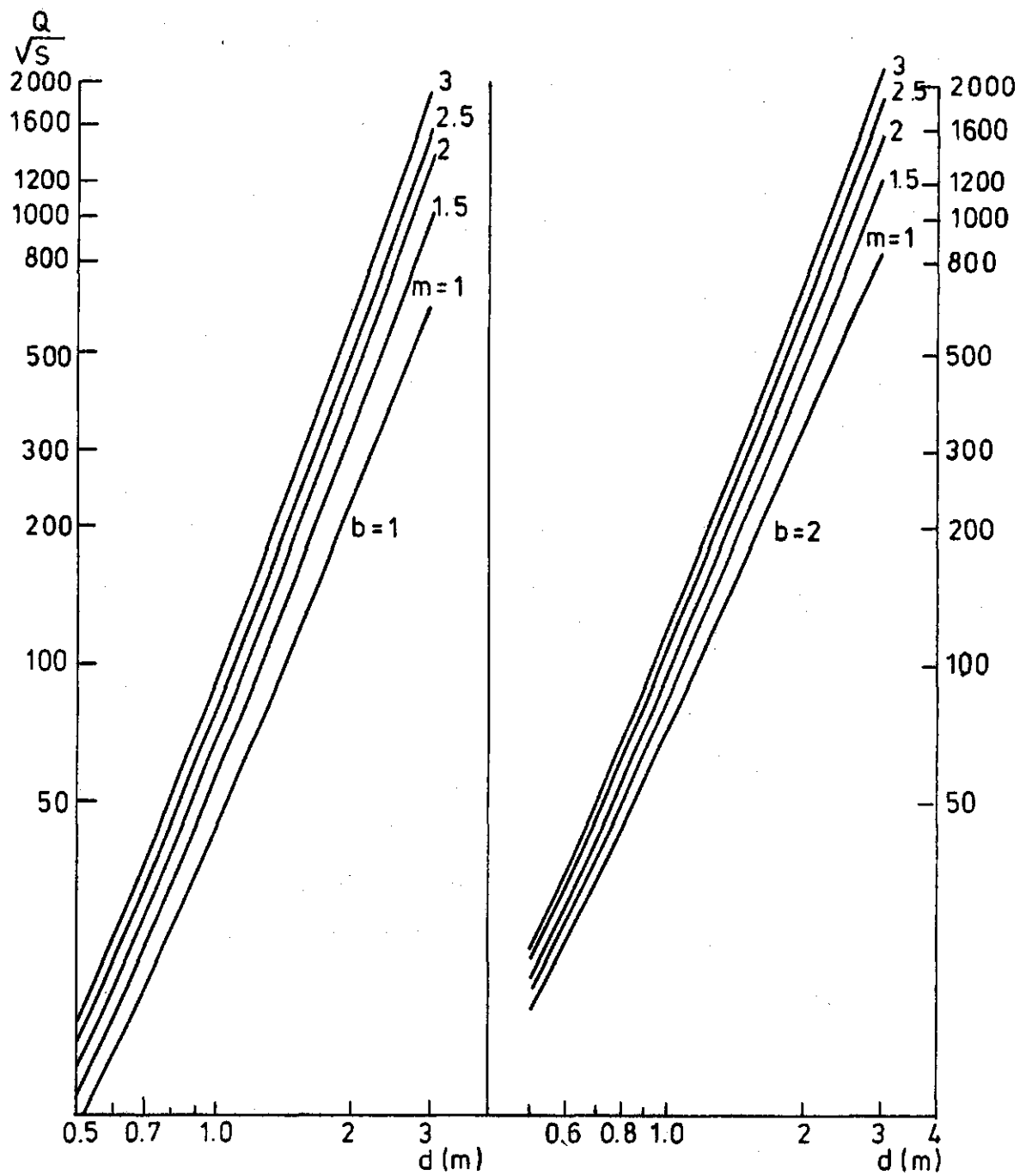


Fig. 2. Relatie tussen waterdiepte d en Q/\sqrt{S} voor verschillende leidin-
gen

Fig. 2 geeft enkele voorbeelden van dit verband uitgerekend met behulp van verg. 7. Omdat hierbij k_M als functie van de waterdiepte is ingevoerd, ontstaan geen zuiver rechte doch enigszins gebogen lijnen. Voor $d < 2,5$ mag echter zonder veel verlies van nauwkeurigheid met een rechte lijn gerekend worden.

Berekeningen voor een groot aantal waarden van b , m en h in verg. 7 leverde als resultaat de tabellen 1 en 2 op.

Tabel 1. Waarden van n in verg. 8 afgeleid uit verg. 7

b \ m	1	2	3
0,5	2,57	2,75	2,82
1,0	2,51	2,59	2,69
1,5	2,20	2,48	2,59
2,0	2,19	2,40	2,52
2,5	2,15	2,34	2,46
3,0	2,12	2,30	2,41
4,0	2,08	2,23	2,33
5,0	2,05	2,19	2,28
7,0	2,02	2,12	2,20
10,0	2,01	2,09	2,15

Tabel 1 geeft de waarden voor n . Vereffening van de gegevens volgens een machtsfunctie levert op dat

$$n = 0,38(b/m)^{-0,09} \quad (9)$$

Hierbij werd een $r^2 = 0,96$ gevonden (zie fig. 3).

Tabel 2 geeft de waarden van a . Analyse van deze gegevens toont aan dat a kan worden weergegeven door de vergelijking:

$$a = 31b + 24m - 12 \quad (10)$$

Bij de verdere bespreking zal gebruik worden gemaakt van de vergelijkingen 8, 9 en 10.

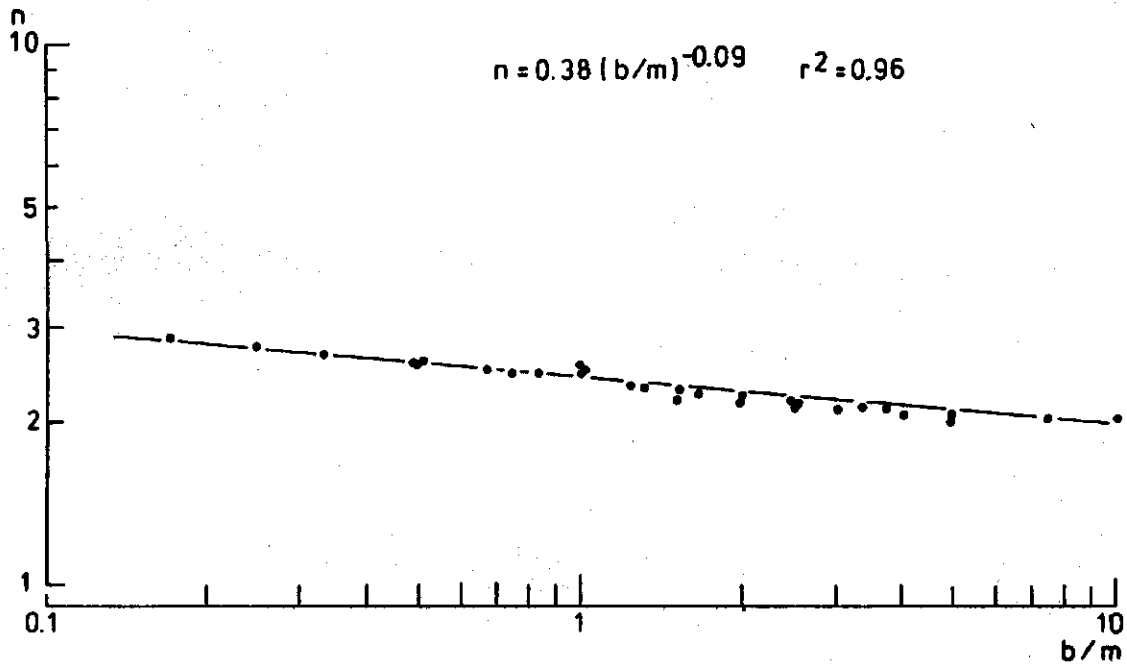


Fig. 3. Verband tussen n en b/m

Tabel 2. Waarden van a in verg. 8, afgeleid uit verg. 7

b \ m	1	2	3
0,5	29,79	53,41	75,77
1,0	43,84	67,90	90,30
1,5	58,59	82,82	105,16
2,0	73,81	98,07	120,27
2,5	89,37	113,56	135,60
3,0	105,16	129,35	151,11
4,0	137,21	161,08	182,55
5,0	169,79	193,34	214,42
7,5	252,23	275,14	295,35
10,0	335,48	357,88	377,40

HALVE MAATGEVENDE AFVOER

Veronderstellen we dat de maatgevende afvoer Q_0 een waterdiepte d_0 oplevert, dan bestaat er volgens verg. 8 tussen deze grootheden en elke willekeurige waarde van Q en d het verband (WESSELING, 1966):

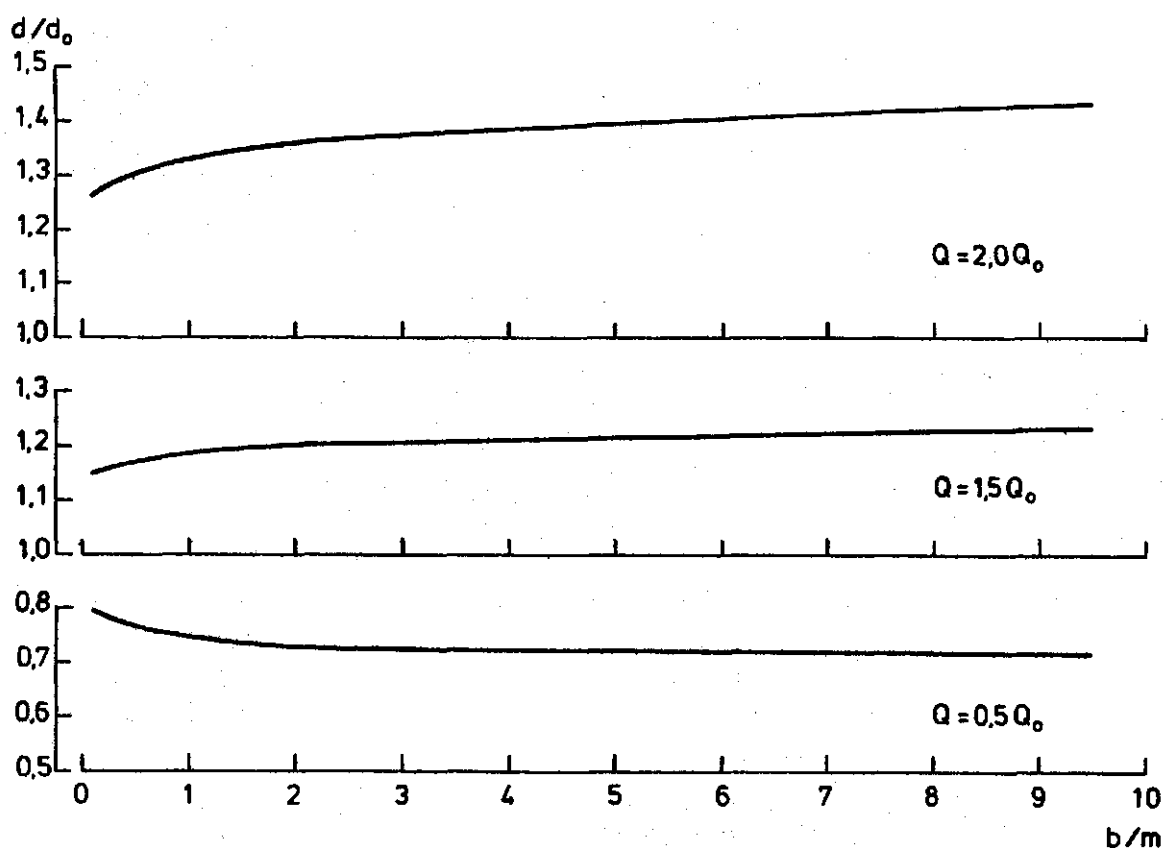


Fig. 4. Waarden van d/d_0 voor verschillende afvoeren

$$Q/Q_0 = (d/d_0)^n \quad (11)$$

Stellen we nu $Q/Q_0 = 0.5$, dan kan d/d_0 worden berekend. Omdat n afhangt van de verhouding b/m , ontstaat een verband tussen d/d_0 en b/m . Dit verband is weergegeven in fig. 4. Voor $Q/Q_0 = 1.5$ (\approx éénmaal per 10 jaar) en $Q/Q_0 = 2.0$ (\approx éénmaal per 100 jaar) is dit verband eveneens berekend. Hierop zal later worden teruggekomen.

In de ontwerppraktijk wordt een afwateringsstelsel berekend met Q_0 . Vervolgens wordt het systeem doorgerekend met $\frac{1}{2}Q_0$. Daarbij wordt de waterdiepte gesteld op 0,7 maal de berekende waarde, dus $d = 0,7 d_0$. Indien het berekende profiel kleiner is dan overeenkomt met dat voor $0,5 Q_0$ en $0,7 d_0$ wordt het vergroot.

In fig. 4 zien we dat voor alle profielen d/d_0 groter is dan 0,7 bij $Q = 0,5 Q_0$. De reeds eerder genoemde norm $Q = 0,5 Q_0$ en $d = 0,7 d_0$ is dus strenger en zal iets grotere profielen geven. Kleinere sloten en sloten met een vlakke taludhelling zullen door de laatstgenoemde norm zelfs iets meer worden overgedimensioneerd.

OVERDIMENSIONERING

Bij overdimensionering ter vermindering van het onderhoud kan men denken aan drie mogelijkheden. In veel gevallen zal men bezwaar kunnen maken tegen een grotere diepte in verband met het gevaar dat de leidingen in de zomer droogvallen. In dat geval zal bij diepere leidingen de grondwaterstand te ver dalen en is men bij overdimensionering aangewezen op vergroting van de breedte. In alle overige gevallen kan men denken aan verdieping en/of verbreding.

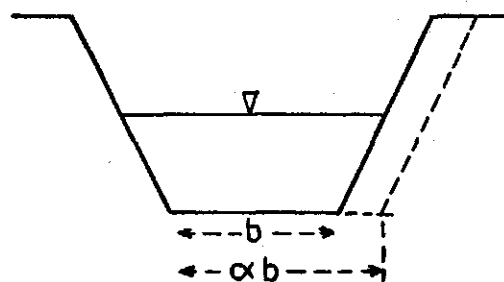


Fig. 5. Verbreding van een leiding

Bij verbreding hebben we de situatie weergegeven in fig. 5. Stel dat de bodem wordt verbreed van b tot een waarde αb . Gaan we nu na wat de capaciteitsvergroting is door deze maatregel, dan kunnen we, gebruik makend van verg. 8, stellen dat

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{a_2 d^n}{a_1 d^n} \quad (12)$$

Invullen van 9 en 10 in deze vergelijking geeft dan:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{31 \alpha b + 24m - 12}{31b + 24m - 12} d^{2,4} (b/m)^{-0,09} (\alpha^{-0,09} - 1) \quad (13)$$

De verhouding Q_2/Q_1 , waarbij Q_2 de capaciteit bij verbreding en Q_1 de ontworpen capaciteit is, kan nu worden berekend door verschillende waarden van b , m , d en α te stellen. Het blijkt nu dat hieruit het volgende verband volgt voor elke waarde van α :

$$\frac{Q_2}{Q_1} = c_1 (b/m)^{c_2} \quad (14)$$

Tabel 3 geeft de waarden van c_1 en c_2 bij de verschillende waarden van α alsmede de gevonden regressie.

Tabel 3. Waarden van c_1 en c_2 bij verschillende waarden van α en de bijbehorende r^2

α	c_1	c_2	r^2
1,1	1,07	0,02	0,81
1,2	1,14	0,04	0,83
1,3	1,21	0,06	0,81
1,4	1,29	0,08	0,83
1,5	1,36	0,09	0,82

Uit de gegevens van tabel 3 valt af te leiden dat

$$c_1 = 0,73\alpha + 0,27 \quad (r^2 = 1,00) \quad (15)$$

$$c_2 = 0,18\alpha - 0,18 \quad (r^2 = 0,99) \quad (16)$$

Uit de bovengenoemde relaties volgt dat gemiddeld de capaciteitsvergroting Q_2/Q_1 voor verschillende waarden van α zijn:

α	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
Q_2/Q_1	1,07	1,13	1,19	1,26	1,33

Een bodemverbreding tot een waarde die 1,5 maal de ontwerpwaarde is geeft dus bij dezelfde waterstand een capaciteitsvergroting van 33%. Aangezien Q recht evenredig is met de waarde van k_M zou dit betekenen dat de k_M -waarde tot $1/1,33 = 0,75$ mag teruglopen wil men de oorspronkelijke capaciteit behouden.

Verdieping van een open leiding kan gunstig zijn in verband met de groei van immerse planten. Zou die groei kunnen worden tegengehouden dan zou de onderhoudsfrequentie op zichzelf al kunnen worden verminderd. Aan dit aspect wordt hier voorlopig voorbijgegaan. We vragen ons dus alleen af wat verdieping hydraulisch tot gevolg heeft. Het te behandelen probleem is weergegeven in fig. 6.

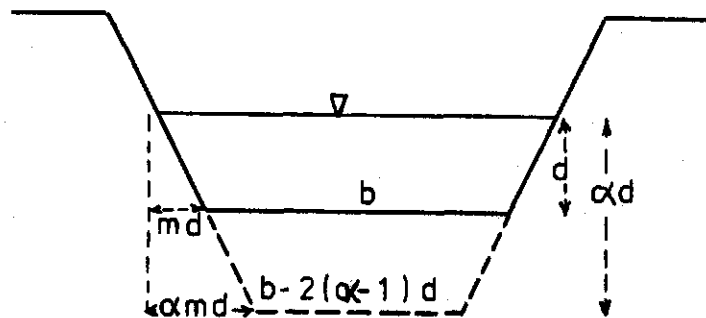


Fig. 6. Verdieping van een leiding

We veronderstellen hier dat de diepte met een zekere factor toeneemt. Gebruik makend van de index 2 voor de nieuwe en de index 1 voor de oude situatie geldt voor de capaciteitsvergroting Q_2/Q_1 :

$$Q_2/Q_1 = \frac{c_2 d_2^{n_2}}{c_1 d_1^{n_1}} \quad (17)$$

of na invullen van 9 en 10:

$$Q_2/Q_1 = \frac{31\{b - 2(\alpha - 1)md\} + 24m - 12}{31b + 24m - 12} \frac{(\alpha d)^{2,4 \left(\frac{b - 2(\alpha - 1)md}{m} \right)^{-0,09}}}{d^{2,4 (b/m)^{-0,09}}} \quad (18)$$

Deze weergave is vrij ingewikkeld, omdat bij toename van de diepte de bodembreedte afneemt om de taludhelling te kunnen handhaven. Omdat de uiteindelijke bodembreedte afhangt van de te realiseren diepte zijn alleen berekeningen uitgevoerd voor een waarde van $d \neq 1$ meter. Tabel 4 geeft een aantal resultaten daarvan.

Tabel 4. Waarden van Q_2/Q_1 bij verdieping, geldend voor $d = 1$ meter

b, m \ α	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
b = 2, m = 1	1,14	1,27	1,38	1,47	1,54
b = 2, m = 2	1,09	1,15	1,18	-	-
b = 2, m = 3	1,05	1,09	1,12	-	-
b = 4, m = 1	1,17	1,34	1,52	1,69	1,86
b = 4, m = 2	1,13	1,25	1,36	1,46	1,53
b = 4, m = 3	1,10	1,19	1,25	1,29	1,31

De cijfers verschillen weinig van die bij verbreding. Alleen als relatief steile taluds gehandhaafd kunnen worden, is het effect groot.

Als laatste stap behandelen we hier een algehele vergroting. Dit principe is weergegeven in fig. 7.

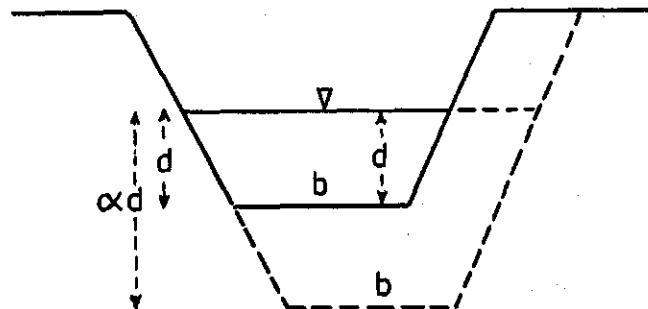


Fig. 7. Vergroting van een leiding

Om de berekeningen zo eenvoudig mogelijk te houden wordt verondersteld dat de bodembreedte constant wordt gehouden. Het verschil met alleen verdiepen is dan dat door de genoemde eis de insteekbreedte ook groter wordt.

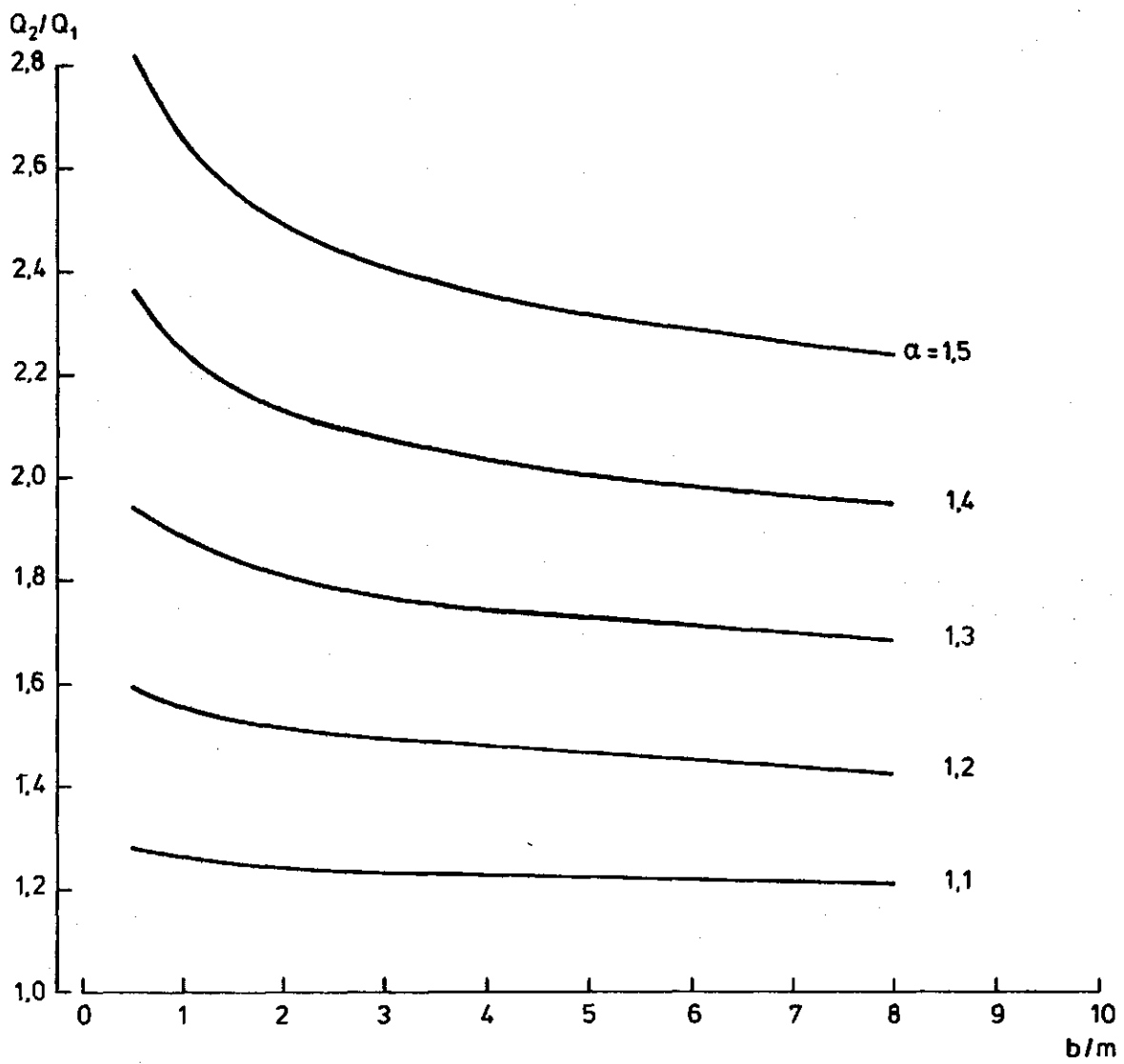


Fig. 8. Verhouding Q/Q_0 bij verschillende vergrotingen

Uitgedrukt in capaciteitsvergroting krijgen we dan:

$$Q_2/Q_1 = \frac{(\alpha d)^{2,4} (b/m)^{-0,09}}{d^{2,4} (b/m)^{-0,09}} = \alpha^{2,4} (b/m)^{-0,09} \quad (19)$$

Fig. 8 geeft de capaciteitsvergroting als functie van de verhouding b/m voor een aantal waarden van α .

Zoals te verwachten valt zijn de hieruit voortvloeiende capaciteitsvergrotingen aanzienlijk. Bij een vergroting van de waterdiepte met een factor 1,4 wordt de capaciteit ongeveer 2 x zo hoog. Voor kleinere sloten loopt dit zelfs op tot 2,2. De vraag blijft echter of de voordelen van vergroting opwegen tegen de kosten.

KOSTEN VAN OVERDIMENSIONERING

Wat betreft de kosten van overdimensionering kunnen twee factoren in rekening worden gebracht en wel:

- grondverzet
- landverlies

Voor de drie onderscheiden gevallen kunnen door vergelijking van oude en nieuwe profielen de volgende verbanden worden afgeleid:

voor verbreding

grondverzet	$(D_0 + d) b (\alpha - 1)$	20a
landverlies	$(\alpha - 1) b$	20b

voor verdieping

grondverzet	$(\alpha - 1) d b m d^2 (\alpha - 1)^2$	21a
landverlies	0	21b

voor verbreding plus verdieping

grondverzet	$(\alpha - 1) d \{ b + (\alpha + 1) d m + 2(\alpha - 1) m D_0 \}$	22a
landverlies	$2m(\alpha - 1) d$	22b

Om met behulp van deze verbanden werkelijke kosten te berekenen, kan gebruik worden gemaakt van een door DE JAGER (1968) gegeven tabel

waarin lengte en grootteklasse van waterlopen zijn gegeven. Deze tabel is als tabel 5 opgenomen.

Tabel 5. Lengte per ha en debietklasse met daaruit volgende gemiddelde profielen en een zandwaterschap

Debietklasse	Debiet m^3/s	m/ha	Afmetingen		
			b m	d m	bovenbreedte m
1	<0,5	13	1,00	0,55	4,75
2	0,5-1,0	2,5	1,70	0,85	6,35
3	1,0-2,0	2	2,10	0,95	8,70
4	2,0-5,0	1,5	3,80	1,15	11,20
5	>5,0	1	7,00	1,50	15,80

De in tabel 5 gegeven indeling is kennelijk gebaseerd op een drooglegging $D_0 = 0,7$ meter. De klassen 1 en 2 hebben een talud $m = 1\frac{1}{2}$. Voor de overige klassen is $m = 2$.

Gebruik makend van deze gegevens en die in tabel 5 kunnen per ha het grondverzet en het landverlies worden berekend. De aldus verkregen waarden zijn weergegeven in tabel 6.

Tabel 6. Grondverzet (gv in m^3) en landverlies (lv in m^2) bij verschillende vergrotingen van leidingen. Cijfers gelden per ha

α	Verbreiding		Verdieping		Vergroting	
	gv	lv	gv	lv	gv	lv
1,1	5,57	3,42	2,98	-	7,86	4,84
1,2	11,14	6,84	5,52	-	16,82	9,67
1,3	16,71	10,26	7,68	-	26,86	14,51
1,4	22,18	13,68	9,42	-	37,99	20,34
1,5	27,85	17,10	10,74	-	52,10	24,18

Om een indruk te krijgen van de kosten van deze uitbreiding kan worden opgemerkt dat 1 m^3 grondverzet kan worden gesteld op $f 4,-$ (BOELS, 1982). De prijs voor landverlies is door Reinds (1982) berekend met behulp van het economisch model AGREVAL. De berekeningen zijn uitgevoerd voor een standaard gemechaniseerd melkveebedrijf van 20 ha. Indien geen waardering van arbeidsbesparing plaatsvindt (grond schaars), komt hij op een verschil in arbeidsopbrengst van $f 0,51/\text{m}^2$. Indien de arbeidsbesparing door het verloren gaan van de grond in rekening wordt gebracht (arbeid schaars) komt hij op $f 0,37/\text{m}^2$.
 Uit deze gegevens volgen de volgende contantwaarden per ha:

	rentevoet 10%	rentevoet 5%
grond schaars	48 000	78 000
arbeid schaars	35 000	57 000

Uitgaande van de situatie 'grond schaars' en een rentevoet van 5% komt 1 m^2 grondverlies neer op $f 7,80$. Dit tezamen met de grondverzetskosten levert de getallen weergegeven in tabel 7.

Tabel 7. Kosten van grondverzet en landverlies bij vergroting van open leidingen. Cijfers in gulden per ha

α	Verbreiding	Verdieping	Vergroting
1,1	48,96	11,92	69,19
1,2	97,91	22,08	142,71
1,3	146,87	30,72	220,62
1,4	195,42	37,68	310,61
1,5	244,78	42,96	397,00

Tegenover de kosten staan baten als gevolg van minder onderhoud. Stellen we de kosten van onderhoud op $f 2,50$ per m leiding dan betekent dat op grond van de gegevens uit tabel 5 een jaarlijks bedrag van $f 50/\text{ha}$ (bij 2 miljoen ha landbouwgrond zou dit neerkomen op $f 100$ miljoen per jaar).

Nemen we vergroting als meest voor de hand liggend dan zal een voor een capaciteitsvergroting met een factor 2 α moeten liggen bij 1,4 (fig. 8). Volgens tabel 7 komt dit neer op ongeveer $f 310$ per ha.

DISCUSSIE

Uit het voorgaande blijkt dat vergroting (= verbreding en verdieping) van leidingen uit hydraulisch oogpunt het meest effectief is. Bij een capaciteitsvergroting met een factor 2 zijn de kosten (f 310,- per ha) niet onaanzienlijk. Hier staat tegenover dat momenteel nog niet kan worden gezegd wat een dergelijke vergroting voor invloed heeft op het onderhoud. Ook zou moeten worden nagegaan, welke invloed een vergroting heeft op het groot onderhoud dat niet elk jaar plaatsvindt.

Teruglopen van de k_M -waarde tot de helft zou neerkomen op een verhoging van het peil dat overeenkomt met een afvoer $2 Q_0$. De hierbij optredende waterdiepten zijn weergegeven in fig. 4. Voor de meeste leidingen betekent dit een verlaging van de waterdiepte met een factor 1,4. Bij een minimum waterdiepte van 0,55 m (de kleinste leidingen) zou dit neerkomen op een waterdiepte van 77 cm of een peilverhoging van 22 cm. Bij een drooglegging van 70 cm zou het peil dan altijd nog 48 cm beneden maaiveld liggen. Van de grotere leidingen met een waterdiepte van 1,50 m zou dezelfde situatie neerkomen op een peilverhoging van 60 cm. Men zou dan al zeer dicht bij overstroming zitten. Vergroot men de sloten met een factor $\alpha = 1,4$, dan zou dezelfde halve k_M -waarde de peilen terugbrengen tot de HW-lijn. Van de andere kant moeten afvoeren tot ca. $4Q_0$ zonder overstroming worden verwerkt of de k_M -waarde zou tot $\frac{1}{4}$ van de oorspronkelijke waarde mogen teruglopen. De kosten van deze vergroting lijken nogal hoog. Bovendien is in de berekeningen geen rekening gehouden met vergroting van kunstwerken. Daar staat tegenover dat wellicht ook op het groot onderhoud bezuinigd kan worden.

LITERATUUR

- BOELS, D, 1982. Persoonlijke mededeling
- BLAUW, H., 1961. De berekening van waterlopen en kunstwerken.
Cult. Tijdschr. 1; 79-100.
- BOS, W.P. en C. BIJKERK (1963). Een nieuw monogram voor het berekenen van waterlopen. Cult. Tijdschr. 4C; 149-155.

- JAGER, A.W. DE, 1968. Betekenis van het onderhoud voor het ontwerp van waterlopen. Cult. Tijdschr. 7; nr. 5.
- LEKAVSKY, S. Irrigation and hydraulic design. Vol. I. General principles of hydraulic design. Chapman Holl. London 1955. 462 pp.
- REINDS, G.H. , 1982. Persoonlijke mededeling.
- WERKGROEP WATERLOPEN, 1958. Richtlijnen voor het ontwerpen van open waterlopen en van sommige bijbehorende kunstwerken. Van Gorcum, Assen. 83 pp.
- WESSELING, J., 1966. De betekenis van de hoogwaterlijn bij beekverbeteringen. Nota ICW 334, 8 pp.
- WILDE, J.G.S., DE, 1970. Invloed van de leidingvorm op de te gebruiken ontwerpnorm. Nota ICW 581, 15 pp.

