

Die jaarlikse reënval, afloop en verhoging in afloop met verhoogde reënval vir die Vaalrivier-opvanggebied by Vaaldam

JP Kriel

MANATWA, Posbus 824, Pretoria 0001, South Africa

Samevatting

Volgens gegewens vir die Vaalrivier tot by Vaaldam is daar, ten spyte van die ingewikkelde uitwerking van talle faktore, 'n duidelike neiging vir die jaarlikse afloop om toe te neem in verhouding met die vierde tot vyfde mag van die jaarlikse reënval oor die opvanggebied. 'n Soortgelyke oorheersende verband tussen die gemiddelde jaarlikse afloop en die gemiddelde jaarlikse reënval is voorheen bepaal vir 275 opvanggebiede versprei oor Suid-Afrika. Dit lei tot die gevolgtrekking dat die potensiële verhoging in afloop met verhoogde reënval so groot is en so belangrik is vir toekomstige watervoorsiening in Suid-Afrika dat navorsing oor die kunsmatige stimulasie van reënval met groot toewyding voortgesit moet word totdat finale uitsluitel oor die praktiese uitvoerbaarheid daarvan al dan nie verkry word.

Die studie van die gegewens het ook getoon dat daar geen noemenswaardige verandering in die reënval oor die opvanggebied was van 1909 tot 1990 nie, maar dat daar 'n relatiewe afname was in die afloop by Vaaldam sedert ongeveer 1948. Dit is ook gevind dat daar 'n neiging is vir beide die getal reëndae en reënval per reëndag om hoër te wees en vir die verdamping om laer te wees in nat jare as in droë jare. Hierdie neigings dra daartoe by dat die jaarlikse afloop relatief veel vinniger toeneem as die reënval. Gemiddeld gee die tydperk Augustus tot Julie 'n beter aanduiding van die hidrologiese jaar vir die Vaaldam-opvanggebied as die tydperk Oktober tot September wat algemeen vir die somerreeënstreek aanvaar word.

Extended summary

(The annual rainfall, runoff and increase in runoff with increased rainfall for the Vaal River catchment at Vaal Dam) Estimates of the future demand for water in South Africa indicate that a shortage of water is likely to occur soon after the year 2020. It has been calculated that the mean annual runoff of all the rivers in South Africa amounts to less than 1% of the average annual volume of atmospheric water vapour in movement over the region. Since 1973 the Water Research Commission has supported research such as that of the Weather Bureau at the Bethlehem Precipitation Research Project into the possibility of abstracting some more of the atmospheric moisture by artificial rainfall stimulation and in this connection it is important to assess the likely effect of an increase in rainfall on runoff.

A study of mean annual rainfall and runoff for 275 catchments all over South Africa indicated that runoff increases relatively much more rapidly than rainfall. In order to ascertain whether this tendency also applies to annual rainfall and runoff on a local scale, a study was carried out for the catchment of the Vaal River upstream of the Vaal Dam for the 81 years from 1909 to 1990. Runoff of a river results from rainfall on its catchment but the interrelationship is complicated by factors briefly mentioned in this paper. For the period concerned the variation of runoff with annual rainfall over the catchment was found to be similar to that for catchments in South Africa as a whole. It was established that the annual runoff is approximately proportional to rainfall raised to a power between four and five, which means that an increase (for example) of 10% in the annual rainfall would lead on average to an increase of about 50% in the annual runoff; an increase of 20% in the rainfall would increase runoff by between 100% and 150%.

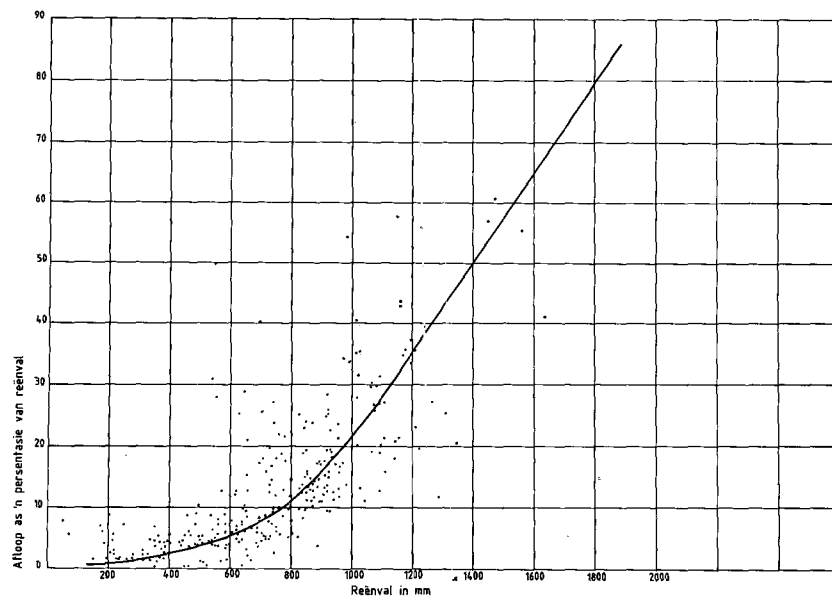
Other findings in the study were the following:

- Although poorly defined, there is a tendency for the number of rain days in a year and average rainfall per rain day to increase with an increase in total rainfall for the year.
- There is a strong indication that the evaporation for a year or for a particular month in a year is lower in periods of high rainfall than in periods of low rainfall.
- The rainfall over the Vaal Dam catchment does not appear to have changed materially between 1909 and 1990, but there is a clear indication of a decrease in runoff at Vaal Dam since about 1948, quite apart from the effect of major upstream works such as the Tugela-Vaal project and Grootdraai Dam.
- Termination of periods of minimal hydrologic activity varies widely between May and October with the most frequent terminations being in August and July.
- The potential increase in runoff corresponding to an increase in rainfall is so great that it is of the greatest importance for South Africa to continue the research on artificial rainfall stimulation until a final conclusion is reached as to whether it is or may in future be feasible.

1. Inleiding

Raming van die toekomstige watergebruik in Suid-Afrika dui daarop dat dit reeds kort na die jaar 2020 die totale benutbare natuurlike waterbronne van die land sal oorskry. Daar is reeds watertekorte in verskeie dele van die gebied (Dept. van Waterwese, 1986; Du Plessis en Van Robbroeck, 1978; Kriel, 1983a). Van die verskillende moontlikhede om watertekorte te bowe te kom (Kriel, 1983a; Dept. van Waterwese, 1986) is die onttrekking van vog uit die atmosfeer een wat ernstige aandag verdien omdat, as dit prakties uitvoerbaar bevind word, dit die grootste potensiële bron van vars water vir Suid-Afrika deels benutbaar kan maak en omdat dit water sal kan lewer op

Received 5 September 1991; accepted in revised form 13 December 1991.



Figuur 1
Gemiddelde jaarlikse afloop en reënval vir 275 opvanggebiede in Suid-Afrika

die binnelandse plato waar die grootste tekort verwag word.

Na raming is die totale hoeveelheid water wat jaarliks in die vorm van atmosferiese waterdamp oor Suid-Afrika (insluitende Swaziland, Lesotho en die TBVC lande), vervoer word, gelyk aan sowat 6 000 km³ (Kriel, 1983b). Hiervan bereik net ongeveer 10% die grondoppervlakte as neerslag d.w.s. 600 km³, en slegs 54 km³ daarvan beland in ons riviere as afloop. Die atmosferiese waterdamptransport oor Suid-Afrika bedra dus gemiddeld meer as honderd maal die afloop van sy riviere en sowat 99% van die atmosferiese water wat die gebied binnekom waai weer weg oor sy grense, hoofsaaklik terug oor die oseane.

Daar is verskillende metodes om water uit die atmosfeer te onttrek, maar weens die lae konsentrasie van gemiddeld minder as 40 mm waterdiepte in die lug tot op 'n hoogte van 10 km bo die oppervlakte (Mc Gee, 1982) sou enorme volumes lug behandel moes word om noemenswaardige hoeveelhede water daaruit te verkry. Dit is dus logies om na te vors of die onttrekkingsproses in die atmosfeer self bevorder kan word deur kunsmatige reënvalstimulering. Gevolglik het die Waternavorsingskommissie al sedert 1973 navorsing in hierdie verband ondersteun (Green, 1989). Hierdie navorsing word tans gekoördineer met die uiters belangrike werksaamhede van die Bethlehemse Neerslagnavorsingsprojek van die Weerburo (Weerburo, 1988). Alhoewel goeie vordering gemaak word, sal uitsluitel oor die moontlikheid om die reënval te verhoog weens die ingewikkelde aard van die navorsing, eers oor 'n lang tydperk verkry kan word. Dit is egter belangrik om 'n aanduiding te hê van die waarskynlike uitwerking van 'n verhoging in reënval op die afloop van riviere.

Volgens 'n studie van die gemiddelde reënval en afloop vir 'n groot aantal riviere met 'n wye verskeidenheid eienskappe in die land as geheel soos afgelei van gegewens in die reeks publikasies *Surface Water Resources of South Africa* (Midgley et al., 1981) gaan 'n verhoging in die reënval gepaard met 'n veel

hoër persentasieverhoging in die afloop, soos aangedui in Fig. 1. Om te bepaal of daar 'n dergelike verband bestaan vir 'n enkele opvanggebied, is 'n studie van die jaarlikse reënval-afloop-verhoudings vir die opvanggebied van die Vaalrivier tot by Vaaldam uitgevoer.

2. Algemene verband tussen reënval en afloop

2.1 Die reënval in sy opvanggebied is die bron van die afloop van 'n rivier, maar die verband tussen die twee is 'n komplekse een wat afhang van verskillende faktore soos byvoorbeeld die volgende (Pitman, 1973; Paling et al., 1989):

- 2.1.1 Verdampingspotensiaal. Onder Suid-Afrikaanse toestande bereik verreweg die meeste van die reënwater nooit die riviere nie omdat dit weer terugkeer na die atmosfeer weens verdamping vanaf die oppervlakte en transpirasie deur plante.
- 2.1.2 Die infiltrasievermoë van die grondoppervlakte bepaal hoeveel van die reënwater direk oor die oppervlakte afloop en hoeveel daarvan eers in die grond wegsak.
- 2.1.3 Die waterhouvermoë en deurlatendheid van die grond en die onderliggende rotsformasies. Deel van die reënwater wat in die grond wegsak verdamp weer van die oppervlakte af, deel daarvan word deur plantwortels onttrek en getranspireer en deel daarvan syfer weg om later, soms eers maande later, die riviere deur uitsyferings of fonteine te bereik.
- 2.1.4 Die intensiteit van die reënval.
- 2.1.5 Die stand van plantegroei in die opvanggebied.
- 2.1.6 Die topografie van die opvanggebied en die voorkoms al dan nie van holtes wat water opvang.
- 2.1.7 Die verspreiding van reënval oor die opvanggebied.

- 2.1.8 Moontlike lekkasie ondergronds uit die opvanggebied.
- 2.2 As 'n groot deel van die reën gedurende 'n bepaalde tydperk vër van die afvoerpunt van 'n opvanggebied val of eers teen die einde van die tydperk voorkom, kan dit gebeur dat baie van die afloopwater wat afkomstig is van die reën eers in 'n volgende tydperk uit die opvanggebied sal vloei. Vir 'n sinvolle vergelyking van die afloop met die reënval is dit dus belangrik dat sodanige oordrag van afloop aan beide die begin en die einde van die tydperk onder oorweging weglaatbaar klein moet wees in verhouding tot die totale afloop vir die betrokke tydperk.
- 2.3 Vir die Vaaldam-opvanggebied is daar in meeste van die jare laagvloeytydperke waartydens die oordrag van afloop weens reën in die voorafgaande jaar betreklik klein is. Jaartydperke wat gekies word om afloopoordragte so veel as moontlik te beperk is dus die logiese keuse vir 'n vergelyking van afloop met reënval.
- 2.4 Reënval en afloop is die enigste veranderlikes wat vergelyk word, maar enkele van die ander faktore wat 'n wisselwerking op reënval en afloop het word ook kortliks bespreek.

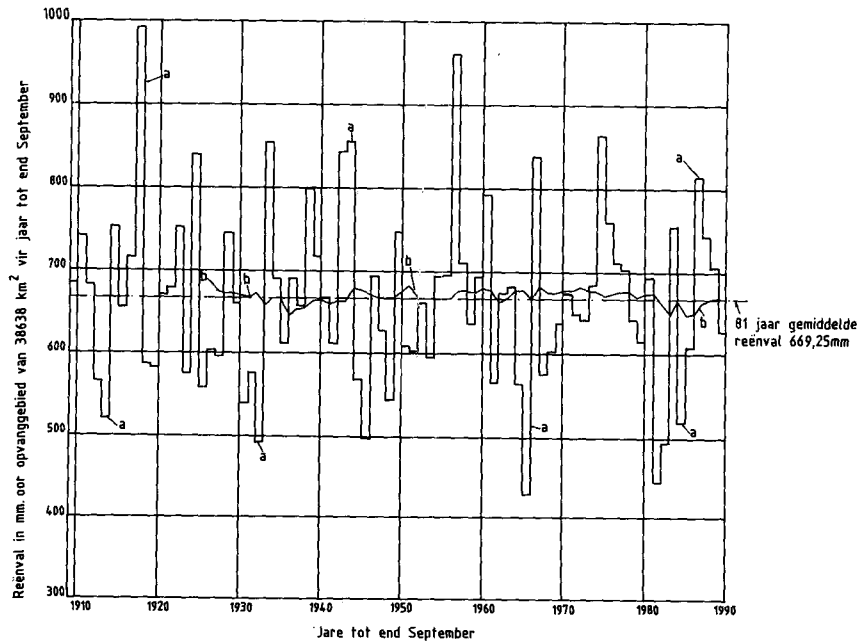
3. Reënval oor die Vaaldam-opvanggebied

- 3.1 Die gemiddelde jaarlikse puntreënval in die Vaaldam-opvanggebied wissel van ongeveer 600 mm tussen Bethlehem en Paul Roux in die suid-weste tot sowat 1 000 mm in 'n klein gebied suid en oos van Harrismith (Weerburo, 1965).
- 3.2 Die gemiddelde reënval oor die opvanggebied as geheel vir elke maand en elke jaar van 1909 tot 1986 is bereken deur Lynch (1990) met behulp van die reënvaldatabank en die rekenaarfasiliteite van die Rekensentrum vir Waternavorsing by die Universiteit van Natal te Pietermaritzburg. Die rekords van alle

- reënvalstasies met 'n looptyd van 15 jaar of meer in en aangrensend aan die opvanggebied is hiervoor gebruik. Die getal het gewissel tussen 60 en 144 gedurende die tydperk van Oktober 1923, toe rivervloeiwaarnemings van die Vaalrivier vir Vaaldam by Engelbrechtsdrift (C2M03) begin en later by Vaaldam self (CIR01) vanaf Oktober 1936 voortgesit is, tot September 1986.
- 3.3 Die prosedure was om die reënval vir elke klein area van een minuut in breedtegraad by een minuut in lengtegraad af te lei van die reënvalstasies se gegewens en daarvolgens die gemiddelde reënval vir elke maand en elke jaar oor die opvanggebied as geheel met sy 12 710 klein 1' x 1' areas te bereken. Volgens die getal 1' x 1' areas is die oppervlakte van die opvanggebied bepaal as 38 638 km² wat baie goed ooreenkom met die 38 505 km² soos aangegee deur die Departement van Waterwese (1985a). Lynch (1990) het ook die gemiddelde reënval oor die opvanggebied as geheel vir dieselfde tydperke bereken op basis van die gemiddeldes van die reënvalstasies. Die meer akkurate gemiddelde jaarlikse reënvalwaardes gebaseer op die 1' x 1' areas se totale was deurgaans effens laer as die gemiddeldes van die reënvalstasies. Vir die 77 jaar van Oktober 1909 tot September 1986 is die langtermyn gemiddelde vir eersgenoemde gelyk aan 666,42 mm per jaar teenoor 682,85 mm per jaar vir die reënvalstasie se gemiddeldes, 'n verskil van 2,4%. Vir die tydperk Januarie 1987 tot September 1990 waarvoor Lynch se berekenings nie beskikbaar was nie, asook vir die kalenderjaar 1986, is gegewens vir 109 reënvalstasies in die opvanggebied van die Weerburo verkry en gemiddelde maandelikse en jaarlikse waardes vir die opvanggebied as geheel bereken en aangepas om ooreen te kom met die basis van die berekenings deur Lynch. Vir die hele tydperk van 81 jaar van Oktober 1909 tot September 1990 kom die gemiddelde jaarlikse reënval vir die opvanggebied as geheel te staan op 669,25 mm. Dit is

TABEL 1
MAANDELIKSE EN JAARLIKSE REËNVAL OOR DIE VAALDAM-OPVANGGEBIED AS GEHEEL, OOR 81 JAAR VANAF OKTOBER 1909 TOT SEPTEMBER 1990

Maand	Gemiddelde mm	Mediaan mm	Minimum mm	Maksimum mm	Jaar van maksimum
Oktober	74,57	61,6	22,6	211,4	(1964)
November	101,30	97,6	24,0	251,2	(1917)
Desember	105,22	104,3	37,5	181,0	(1961)
Januarie	111,72	107,3	39,7	215,2	(1934)
Februarie	86,87	87,1	26,2	193,0	(1953)
Maart	73,45	71,0	5,4	205,0	(1925)
April	39,73	33,4	1,6	126,3	(1943)
Mei	18,23	11,1	0,1	102,1	(1936)
Junie	7,99	2,7	0	52,9	(1944)
Julie	8,87	1,6	0	72,4	(1957)
Augustus	12,56	5,4	0	81,7	(1979)
September	28,75	18,5	0,8	178,1	(1957)
Okt-Sept	669,25	669,6	430,20	992,3	(1917/18)



Figuur 2
Opvanggebied van Vaalrivier by Vaaldam CIOI
a: Jaarlikse reënval oor opvanggebied
b: 18 Jaar lopende gemiddelde reënval oor opvanggebied

TABEL 2 GETAL REËNDAE EN REËNVAL PER REËNDAG BY VAALDAM						
Reënmeter by verdampingstasie CIOI 48 jaar, Okt. 1938 tot Sept. 1986.						
Maand	Gemiddelde reënval vir maand mm	Getal reëndae			Reënval per dag	
		Min.	Maks	Gemiddelde	Maksimum mm/dag	Gemiddelde mm/dag
Oktober	73,65	1	18	8,15	95,0	9,04
November	91,54	4	17	10,42	78,5	8,79
Desember	114,36	1	18	11,06	116,2	10,34
Januarie	108,53	4	18	11,02	108,1	9,85
Februarie	79,98	3	15	9,0	110,4	8,88
Maart	69,94	3	14	8,06	107,7	8,68
April	45,51	0	15	6,19	57,8	7,35
Mei	20,77	0	10	3,23	38,6	6,43
Junie	8,37	0	7	1,48	25,4	5,66
Julie	9,07	0	8	1,23	31,7	7,37
Augustus	9,96	0	9	1,62	41,8	6,23
September	21,62	0	12	3,13	78,5	6,91
Totaal vir jaar	653,82	39	99	74,5	116,2	8,78

3% laer as die som van die gemiddelde maandelikse reënvalle, nl. 686,9 mm, aangegee deur Taljaard en Steyn (1988) in hulle Tabel 1 vir die 52 jaar 1936 tot 1987. Na my mening is die gemiddelde reënvalsyfers vir die opvanggebied as geheel soos bereken deur Lynch die betroubaarste wat beskikbaar is.

3.4 Die gemiddelde reënval oor die Vaalrivier-opvanggebied vir elk van die 81 jare van Oktober 1909 tot September 1990 word grafies aangetoon in Fig. 2. Hierdie diagram toon duidelik aan dat die jaarlikse reënval baie wisselvallig is. Om 'n beter beeld te kry van die tendense van die reënval oor die lang termyn is die

lopende gemiddeldes van die reënval vir 18 jaar, 'n tydperk wat ooreenkom met die ossilasieperiode in reënval vir die somerreënvalstreek in Suid-Afrika soos beskryf deur Tyson (1986) ook in Fig. 2 aangedui. Daarvolgens blyk dit dat daar geen noemenswaardige verandering in die reënval oor die lang termyn van 1909 tot 1990 in die Vaaldam-opvanggebied was nie.

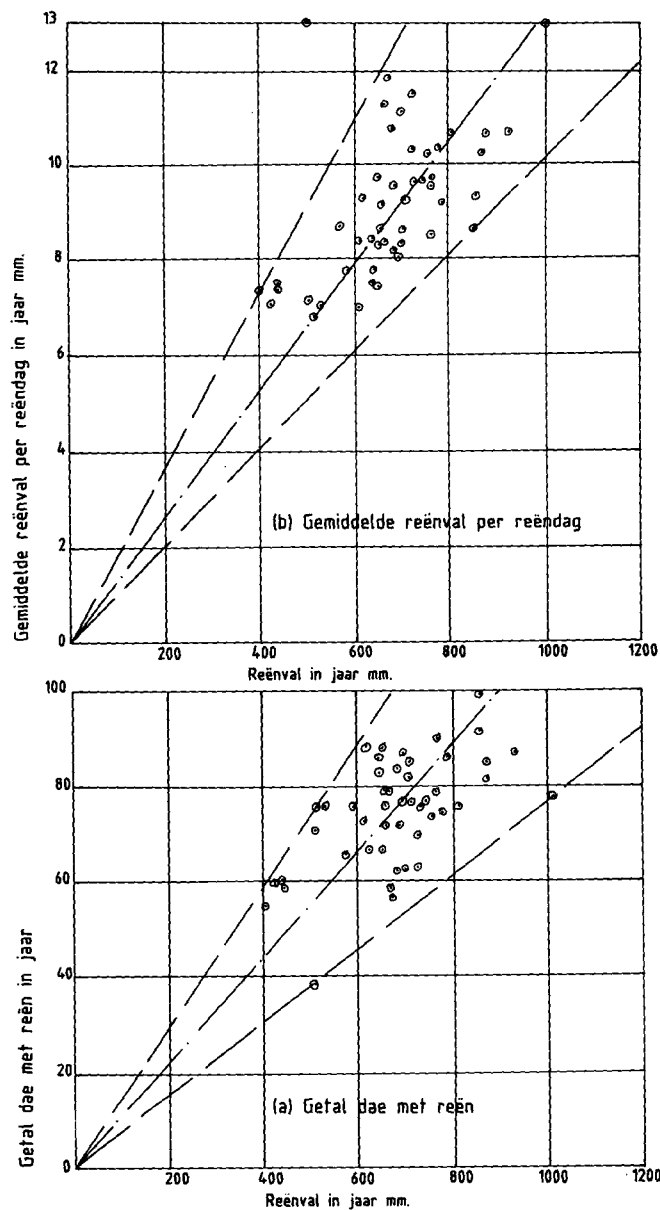
- 3.5 Die seisoenale verspreiding van die reënval word aangedui in Tabel 1. As die reënval vir die twee jaar 1942/43 en 1956/57, toe die reënval in Julie besonder hoog was teen meer as 70 mm, buite rekening gelaat word, verander die gemiddelde waardes vir Junie en Julie na 7,90 en 7,26 mm onderskeidelik, sonder verandering van die mediaan-waardes. Julie kan dus beskou word as die maand met normaalweg die laagste reënval.

4. Daaglikse reënvalvoorkomste

- 4.1 Die getal reëndae word nie altyd betroubaar aangeteken nie (Taljaard en Steyn, 1988), maar dit word gemeen dat waarnemings in hierdie verband by verdampstasie CIE01 van die Departement van Waterwese by Vaaldam wesenlik korrek is. Besonderhede hieromtrent word aangegee in Tabel 2 en die getal reëndae sowel as die gemiddelde reënval per reëndag vir elke jaar is in Fig. 3 uitgestip teenoor die jaarlikse reënval.
- 4.2 Uit Tabel 2 en Fig. 3 blyk dit dat die maksimum reënval op 'n dag van dieselfde orde grootte is as die gemiddelde reënval vir die hele maand, en dat, ten spyte van 'n groot speling in waardes, daar tog 'n neiging is vir die getal reëndae en die hoeveelheid reën per reëndag om hoër te wees in jare met 'n hoër reënval.
- 4.3 Met inagneming van die faktore genoem in Afdeling 2.1 is dit waarskynlik dat hoe meer reën op 'n dag val, hoe groter sal die aflooppersentasie wees. Dit volg dus uit die voorafgaande Paragraaf 4.2 dat die aflooppersentasie in nat jare sal neig om hoër as in droë jare te wees.

5. Verdamping

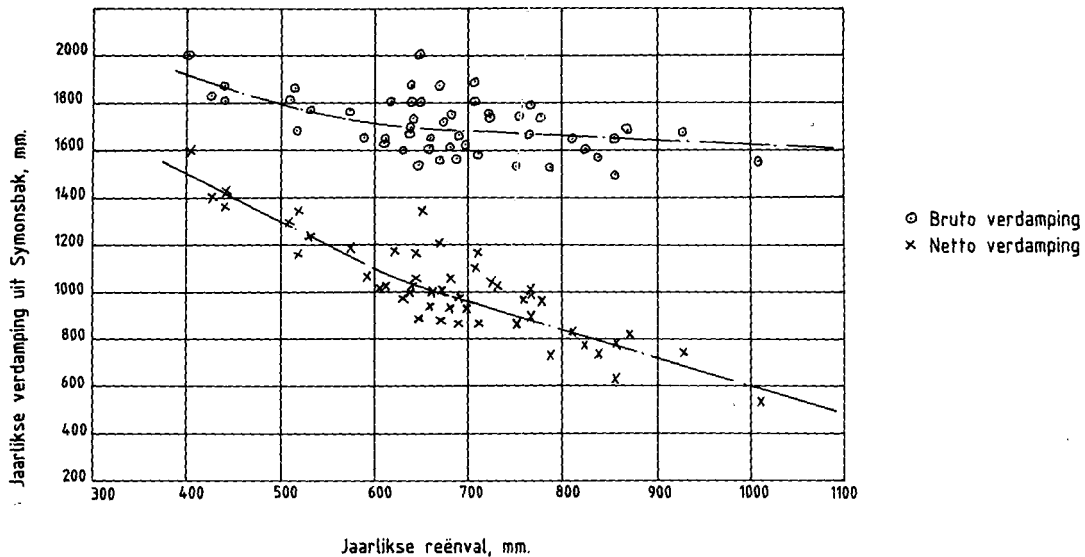
- 5.1 Daar is nog 'n mate van onsekerheid oor die bepaling van die verdampingspotensiaal van die atmosfeer wat gewoonlik aanvaar word as gelyk aan die verdamping van 'n groot wateroppervlakte (Nash, 1989; Granger, 1989-a en b; Granger en Gray, 1989). Die verdampingspotensiaal beïnvloed die werklike verdampingstempo vanaf vry water en die grondoppervlakte en ook die transpirasie deur plante. Die algemeenste en mees praktiese metode om 'n aanduiding van die verdampingspotensiaal te verkry is om die verdamping uit 'n A-tipe verdampbak of 'n Symonsbak te meet. Laasgenoemde word deur die Departement van Waterwese gebruik om verdampingsverliese uit groot opgaardamme te bereken.
- 5.2 Die verdamping uit die S-bakke en A-bakke verskil van mekaar en Bosman (1990) het bevind dat die waardes ook deur hulle omgewing beïnvloed word. Die gemiddelde verdamping uit die twee tipes verdampbakke by die verdampstasie CIE01 te Vaaldam, volgens gegewens van die Departement van Waterwese (1985b en 1990), word aangegee in Tabel



Figuur 3
Getal reëndae per jaar en gemiddelde reënval per reëndag in verhouding tot jaarlikse reënval, CIE01 te Vaaldam Okt. 1938 tot Sept. 1986

3. Volgens Kriel (1963) en Barker en Whitmore (1965) is die verdamping van 'n groot wateroppervlakte oor 'n jaar gemiddeld gelyk aan tussen 0,81 en 0,87 van dié van 'n Symonsbak, maar hierdie faktor wissel van sowat 0,66 in September tot naasteby 0,98 in Mei.

- 5.3 Die gemiddelde seisoenale wisseling waarvolgens die hoogste verdamping voorkom in die maande met die hoogste reënval volgens die gegewens in Tabel 3 geld egter glad nie vir ooreenstemmende tydperke in verskillende jare nie. Daar is in werklikheid 'n besliste neiging vir die verdamping om laer te wees in tydperke met 'n hoër reënval soos blyk uit Fig. 4 vir die jaarlikse verdamping uit 'n Symonsbak in



Figuur 4
Jaartikse reënval en verdamping, CIEO1 te Vaaldam Okt. 1938 tot Sept. 1988

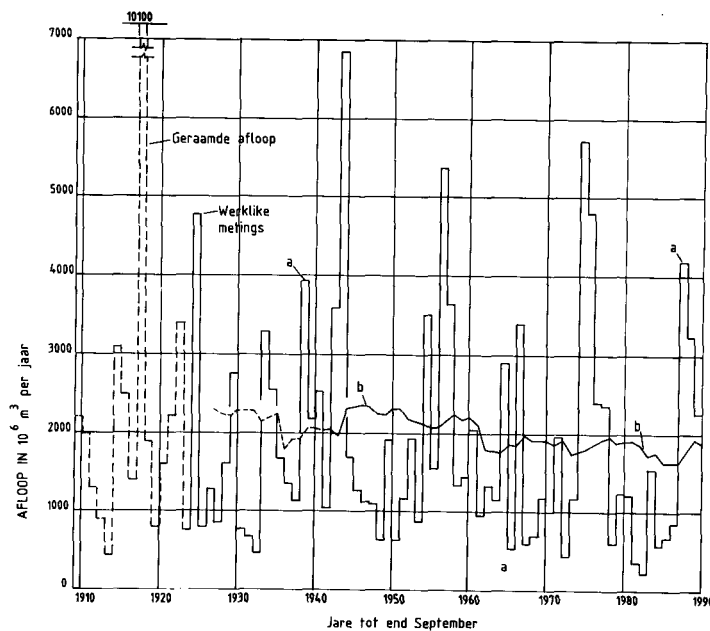
TABEL 3 GEMIDDELDE VERDAMPING UIT SYMONS- EN A-TIPE VERDAMPBAKKE TE VAALDAM, CIEO1				
Tydperk Oktober 1967 tot September 1988				
Maand	Symons- verdampbak S mm	A/Tipe verdampbak A mm	Verhouding S/A	Reënval mm
Oktober	176,3	221,0	0,798	82,4
November	184,5	232,0	0,795	96,5
Desember	198,0	236,9	0,836	126,5
Januarie	193,9	229,2	0,846	108,1
Februarie	168,6	195,6	0,862	66,1
Maart	153,8	177,4	0,867	69,0
April	115,5	137,5	0,840	47,6
Mei	95,3	115,4	0,826	14,7
Junie	75,2	89,5	0,840	7,3
Julie	80,6	101,9	0,791	4,2
Augustus	113,5	145,0	0,783	15,4
September	148,9	187,9	0,792	29,5

verhouding tot die reënval by CIEO1 vir die 50 jaar Oktober 1938 tot September 1988. Gevolglik moet aanvaar word dat in nat jare die verdampingspotensiaal en dus die hoeveelheid reënwater wat na die atmosfeer terugkeer weens evapotranspirasie relatief minder sal wees in nat jare as in droë jare. Dit versterk dus die neiging vir die afloop om in nat jare 'n groter persentasie van die reënval as in die droë jare te wees waarna ook in Afdeling 4.3 verwys is.

- 5.4 Die verdamping is baie minder wisselvallig as die reënval. Vir die 50 jaar hierbo genoem was die maksimum Symonsbak-verdamping vir 'n jaar gelyk aan 1,34 keer die minimum en die maksimum reënval 2,51 keer die minimum.

6. Afloop van die Vaalrivier by Vaaldam

- 6.1 Die maandelikse afloopsyfers van die Vaalrivier by Vaaldam en die totale vir die jare Oktober tot September soos gemeet by meetstasies C2M3 (Engelbrechtsdrift) tot 1936 en by CIR01 (Vaaldam) daarna is verkry van die Afdeling Hidrologie van die Departement van Waterwese (1989) vir die tydperk Oktober 1923 tot September 1990. Die werklike syfers soos gemeet is deur die Departement aangepas om die invloed van die Tugela-Vaal projek, met opgaring wat in November 1974 in Sterkfontein dam begin het, en die uitwerking van Grootdraaidam in die Vaalrivier waar opgaring in Desember 1978 begin het, uit te skakel.



Figuur 5

Opvanggebied van Vaalrivier tot by Vaaldam CIROI

a: Jaarlikse afloop vir jaar tot end September

b: 18-jaar lopende gemiddelde afloop tot end September

L.W. Afloopgegevens is aangepas om invloed van Sterkfonteindam sedert Nov. 1974 en van Grootdraaidam sedert Des. 1978 uit te skakel

TABEL 4				
RIVIERVLOEIMEETSTASIES VOOR 1923 IN DIE OPVANGGEBIED VAN DIE VAALRIVIER				
Meetstasie nommers	Rivier en plek	Opvanggebied, km ²	Begin van waarnemings	
a) C1M01	Vaal te Standerton	8 193	Feb. 1905	
b) C1M02	Klip te De Langesdrift	4 152	Okt. 1906	
c) C8M01	Wilge te Frankfort (Plaas Kimberley	15 390	Okt. 1913	
do	Wilge te Frankfort	15 673	Okt. 1923	
d) C2M10	Vaalrivier te Vereeniging	44 665	Des. 1900-Sept. 1922	
e) C2M08	Vaalrivier te Lindequesdrift	47 221	Jan. 1923	
f) C9M03	Vaalrivier te Riverton	121 000	Jan. 1909	

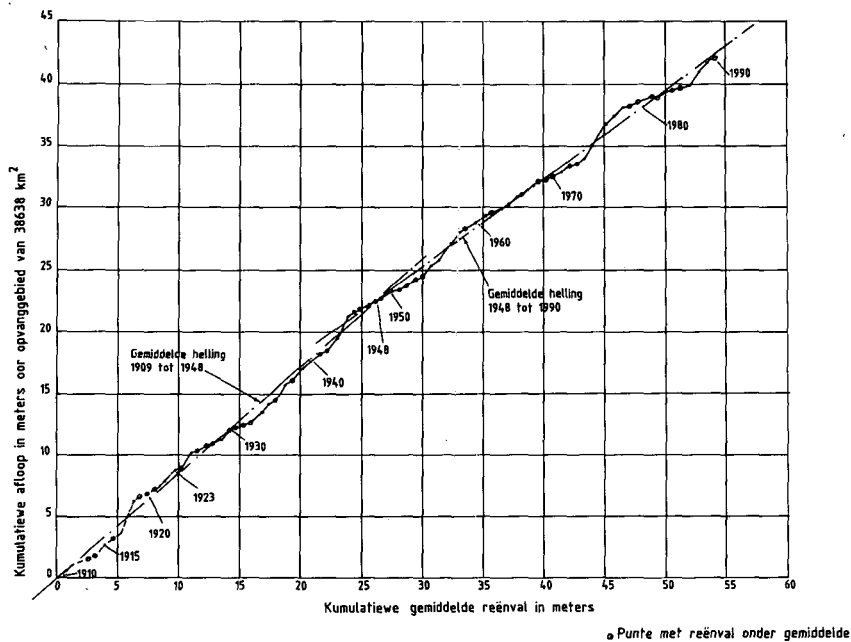
6.2 Voordat waarnemings by Vaaldam in 1923 begin het, is riviervloeiemetinge by plekke aangegee in Tabel 4 in die Vaalrivier-opvanggebied gedoen (Departement van Waterwese, 1964).

6.3 Tot 1936, toe die Vaalhartskanaal gebou is, was onttrekking van water vir besproeiing bokant Riverton betreklik gering en die 35,7 miljoen m³ water wat die Randwaterraad in 1935 voorsien het was minder as 2% van die gemiddelde jaarlikse afloop by Vaaldam. Dit is dan ook gevind dat vir die jare 1923 tot 1936 daar 'n redelike goeie korrelasie bestaan het tussen die jaarlikse afloop by Vaaldam en die totaal vir die meetstasies (a), (b) en (c) in Tabel 5, en die jaarlikse afloop gemeet by (d) en (e) en by (f). Op hierdie basis is ramings gemaak van die jaarlikse afloop by Vaaldam

vir die tydperk 1909 tot 1923.

6.4 Die natuurlike afloop by Vaaldam vir elke jaar van begin Oktober tot einde September vir die 81 jaar van 1909 tot 1990 is uitgestip in Fig. 5. 'n Vergelyking van hierdie figuur met Fig. 2 toon duidelik aan dat die jaarlikse afloop nog meer wisselvallig is as die jaarlikse reënval. Die hoogste afloop vir 'n jaar was 10 100 x 10⁶ m³, gelyk aan 'n diepte van 261,40 mm oor die opvanggebied van 38 637 km², in die jaar 1917/18, dieselfde jaar waarin die hoogste gemiddelde reënval van 992,3 mm oor die opvanggebied as geheel aangeteken was.

6.5 Op Fig. 5 is die 18-jaar lopende gemiddeldes van die afloop ook ingeteken soos die geval is op Fig. 2 vir die reënval. Hiervolgens kom dit voor dat sedert



Figuur 6
Massakromme van afloop by Vaaldam CIROI en gemiddelde reënval oor opvanggebied

TABEL 5
SEISOENVERSPREIDING VAN AFLOOP BY VAALDAM
CIROI GEMIDDELDE WAARDES OKT. 1923 TOT SEPT. 1990

Maand	Gemiddelde afloop	
	10 ⁶ m ³	Diepte oor opvanggebied van 38 638 km ² mm
Oktober	118,09	3,06
November	242,85	6,29
Desember	317,74	8,22
Januarie	313,26	8,11
Februarie	412,57	10,68
Maart	225,72	5,84
April	45,30	2,47
Mei	60,69	1,57
Junie	22,90	0,59
Julie	35,69	0,92
Augustus	22,60	0,58
September	56,84	1,47

ongeveer 1948 daar 'n besliste afname was in die afloop van die Vaalrivier by Vaaldam. Hierdie neiging word bevestig deur die massakromme van kumulatiewe afloop teenoor kumulatiewe reënval aangetoon in Fig. 6, waar daar volgens die langtermyn gemiddelde hellingslyne 'n verlaging in die helling intree by ongeveer 1948. Hierdie daling in afloop val saam met die waargenome feit dat net na die Tweede Wêreldoorlog van 1939 tot 1945 daar grootskaalse ontwikkeling was in die opvanggebied van die Vaalrivier, wat saamgegaan het met 'n groter waterverbruik vir besproeiing sowel as deur dorpe en stede.

6.6 Die seisoenale verspreiding van die afloop word

aangedui in Tabel 5 deur die gemiddelde maandelikse waardes vir die 67-jaar periode van Oktober 1923 tot September 1990. Volgens die tabel is Februarie die maand met die hoogste gemiddelde afloop en Junie tot Augustus die maande met die laagste. As die gegewens vir die twee jare 1942/43 en 1956/57, toe daar buitengewone hoë winterreënval voorgekom het buite rekening gelaat word, verander die gemiddelde waardes vir Junie, Julie en Augustus oor die oorblywende 65 jaar na 0,58 mm, 0,55 mm en 0,50 mm respektiewelik. Dit kan dus aanvaar word dat Augustus gewoonlik die maand met die laagste afloop is.

7. Hidrologiese jare

Die Departement van Waterwese het lank gelede al die tydperk Oktober tot September aanvaar as verteenwoordigend van hidrologiese prosesse se wisseling. Wat die Vaaldam-opvanggebied betref blyk uit die bespreking van reënval in Afdeling 3.5 hierbo en die bespreking van afloop in Afdeling 6.6 dat die hidrologiese siklus normaalweg in Julie 'n laagtepunt in aktiwiteit bereik en dat die tydperk Augustus tot Julie in hierdie geval eintlik 'n beter keuse as hidrologiese jaar sou wees. In werklikheid is daar 'n aansienlike wisseling van jaar tot jaar in die maande waarin die laagste afloop en reënval voorkom.

Vir 'n studie van die verband tussen die jaarlikse reënval en jaarlikse afloop is dit belangrik, soos gemeld in Afdeling 2.2 en 2.3 hierbo, dat die oordrag van afloop beide aan die begin en die einde van 'n jaar betreklik klein moet wees in verhouding tot die afloop vir die betrokke jaar. As eerste benadering om dit te verseker is vir die 67 jaar van 1923 tot 1990 waarvoor maandelikse gegewens beskikbaar was, die jaartydperke so gekies dat die reënval en die afloop in die laaste maand van die vorige jaar en in die laaste maand van die betrokke jaar, uitgedruk as persentasie van die totaal van elk in die betrokke jaar, die laagste

waardes het. Die resultate van hierdie studie was soos volg:

- In net een geval, nl. in 1943/44 toe daar 'n hoë winterreënval was, was die reënval of die afloop in die laaste maand van die vorige jaar of in die laaste maand van die jaar self meer as 5% van die jaartotaal. Die persentasie was minder as 2% in 86% van die getal jare vir beide reënval en afloop en minder as 1% in 61% van die gevalle vir die reënval en 46% van die gevalle vir die afloop.
- Die laaste maand van die gekose jaartydperke het gewissel soos volg:

Getal jaartydperke met eindes aan die einde van Mei :	5
	Junie : 16
	Julie : 18
	Aug. : 24
	Sept. : 3
	Okt. : 1
Totale jaartydperke :	67

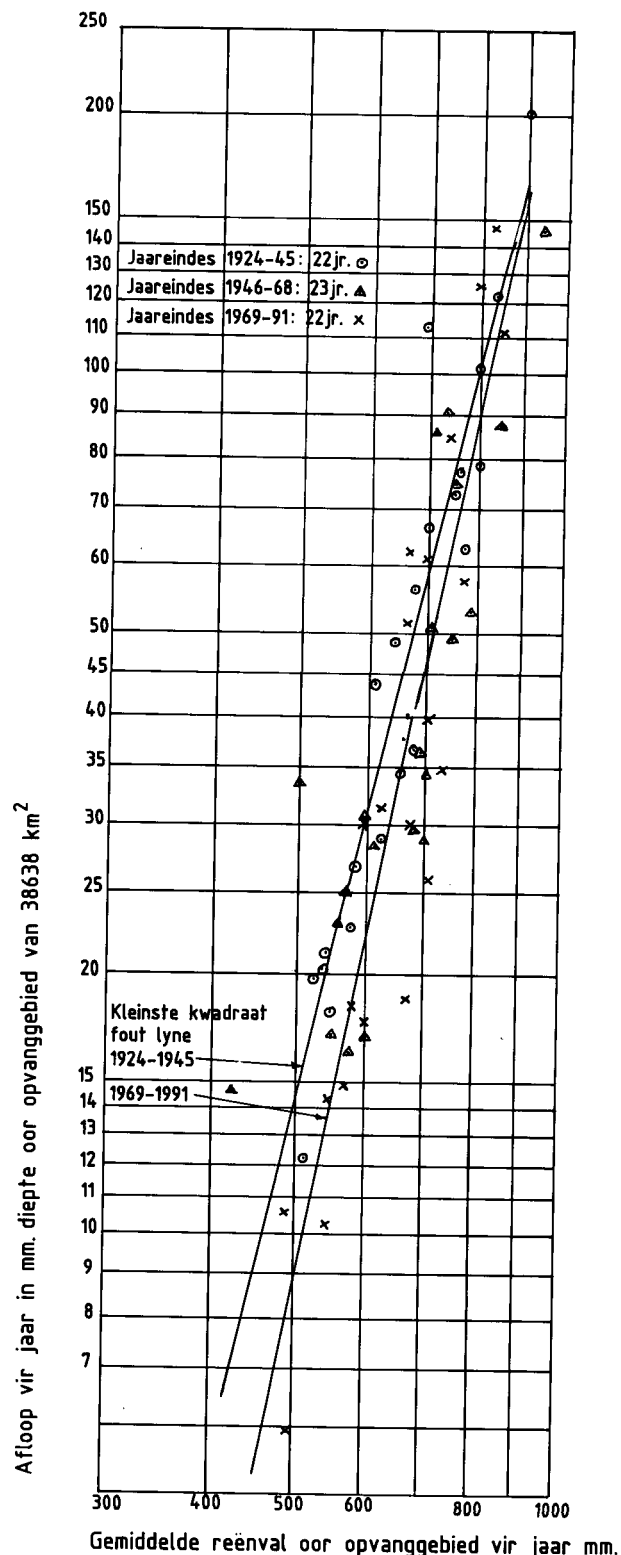
Hierdie gegewens bevestig dat daar 'n wisseling is in die werklike hidrologiese jaartydperke en dat die logiese keuse vir 'n gemiddelde vir Vaaldam-opvanggebied die tydperk Augustus tot Julie sou wees. 'n Meer betroubare benadering vir die bepaling van die jaarlikse afloop in verhouding tot die jaarlikse reënval sou wees om die vertraagde afloop wat aan die einde van 'n jaartydperk nog verwag kan word weens reën in dieselfde jaar, te bereken op basis van 'n hidrologiese model soos dié van Pitman (1973). Daarvolgens sou dan aanpassings gemaak word aan die werklike afloop wat in die jaar gemeet is. Vir die doel van hierdie studie is egter gevind dat met die benadering wat gevolg is aanvaarbare resultate vir die verband tussen die jaarlikse reënval en afloop bepaal kon word.

8. Verband tussen reënval en afloop vir die Vaaldam-opvanggebied

8.1 Dit is gevind dat as die punte vir die afloop (berekend as 'n diepte water oor die opvanggebied van 38 638 km² vir elke jaartydperk wat bepaal is soos beskryf in die vorige afdeling) uitgestip word op logaritmiese grafiekpapier teenoor die reënval vir die betrokke jaar die punte naasteby op 'n reguit lyn lê soos aangetoon in Fig.7.

8.2 Omdat soos gemeld in Afdeling 6.5, daar klaarblyklik 'n afname in die afloop by Vaaldam was sedert ongeveer 1948, is daar nie gepoog om 'n enkele verband tussen reënval en afloop vir die hele 67 jaar van 1923 tot 1990 te bepaal nie. In stede daarvan is reguitlyne vir die logaritmiese waardes volgens die kleinste-kwadraat-fout-metode bereken om die beste te pas by die punte vir die eerste 22 jaar d.w.s. vir jaartydperke wat eindig in 1924 tot 1945 toe die afloop nog nie noemenswaardig deur ontwikkeling versteur was nie, en vir die laaste 22 jaar nl. vir jaareindes in 1969 tot 1990, toe in groot deel van die ontwikkeling van besproeiing in die opvanggebied reeds afgehandel was. Die vergelykings van hierdie reguitlyne is soos volg:

- Q: afloop vir jaar in mm
- R: reënval vir jaar in mm



Figuur 7
Reënval en afloop vir Vaaldam se opvanggebied Okt. 1923 tot Sept. 1990. Logaritmiese skale

• **Eerste 22 jaar met jaareindes in 1924 tot 1945**

Die berekende vergelyking is:

$$\text{Log } Q = -10,138 + 4,18134 \text{ log } R$$

Die korrelasie koëffisiënt is $r = 0,943$ ($r^2 = 0,88885$)

Hierdie vergelyking reduseer na:

$$Q = \frac{R^{4,181}}{10^{10,138}} \quad (2)$$

Vir maklike berekening op 'n handrekenaar is dit omskryf na:

$$Q = \left(\frac{R}{100}\right)^{4,181} / 10^{1,776} \quad (3)$$

• **Laaste 22 jaar met jaareindes in 1969 tot 1990**

Hierdie berekende vergelyking is:

$$\text{Log } Q = 12,415 + 4,946 \text{ log } R \quad (4)$$

Die korrelasiekoëffisiënt is $r = 0,911$ ($r^2 = 0,83030$)

Dit reduseer na:

$$Q = \frac{R^{4,946}}{10^{12,415}} \quad (5)$$

en vir maklike berekening op 'n handrekenaar is:

$$Q = \left(\frac{R}{100}\right)^{4,946} / 10^{12,415} \quad (6)$$

Die twee lyne is ingeteken in Fig. 7. Hulle toon duidelik aan dat daar 'n skerp toename is in die afloop per eenheid reënval soos die reënval toeneem en dat die afloop in verhouding tot die reënval verminder het van die tydperk 1923/45 tot die tydperk 1969/91.

9. Vermindering in afloop by Vaaldam

Soos gemeld in Afdeling 6.5 hierbo is daar sedert ongeveer

TABEL 6 JAARLIKSE REËNVAL EN AFLOOP VOLGENS KLEINSTE-KWADRAAT-FOUTLYNE IN FIG. 7			
Jaarlikse reënval mm	Jaarlikse afloop in mm oor opvanggebied van 38 638 km ²		Persentasievermindering 1923/45 tot 1969/91
	1923-1945 mm	1969-1991 mm	1969/91 %
500	14,01	8,83	37,0
800	99,97	87,8	12,2
900	163,6	157,3	3,9
669,26 (gemiddelde 1909-1991)	47,41	36,34	23,3

1948 tot 1950 aanduidings dat die afloop by Vaaldam verminder het weens ontwikkeling in die opvanggebied. Hierdie neigings word bevestig deur die lyne vir die jaarlikse afloop vir verskillende jaarlikse reënvalwaardes in Fig. 7. Verteenwoordigende waardes word aangegee in Tabel 6.

Met onttrekking van water uit die riviere in die opvanggebied vir besproeiing of huishoudelike gebruik is dit vanselfsprekend dat die lae vloei die meeste geaffekteer sal word soos bevestig word deur die gegewens in Tabel 6. Daar is relatief hoë persentasievermindering in die afloop by die dam gedurende droër tydperke, maar geen noemenswaardige persentasievermindering in die afloop in nat jare nie, omdat die watergebruik vir sulke jare klein is in vergelyking met die afloop. Omdat die jaarlikse afloop nie reglynig met die reënval wissel nie, is 'n eenvoudige weergawe van die omvang van die vermindering in afloop nie moontlik nie en die bepaling van 'n indeks van die vermindering van afloop met die verloop van tyd word ook bemoeilik deur die aansienlike verspreiding van die jaarlikse waardes. Gevolglik is die werklike afloop en reënval vir elke jaar gebruik om 'n raming te maak van die afloop wat in ooreenstemming met Vgls. 1 en 2 vir die tydperk 1924 tot 1945 verwag sou kon word indien die langtermyn gemiddelde reënval van 669,25 mm in die betrokke jaar oor die opvanggebied voorgekom het. Die afloop Q' vir die jaar is aangepas volgens die langtermyn gemiddelde reënval R' , nl. Q' is bereken van die vergelyking:

$$Q' = Q \left(\frac{R'}{R}\right)^{4,181}$$

waar Q = werklike afloop vir jaar.

R = werklike reënval vir jaar.

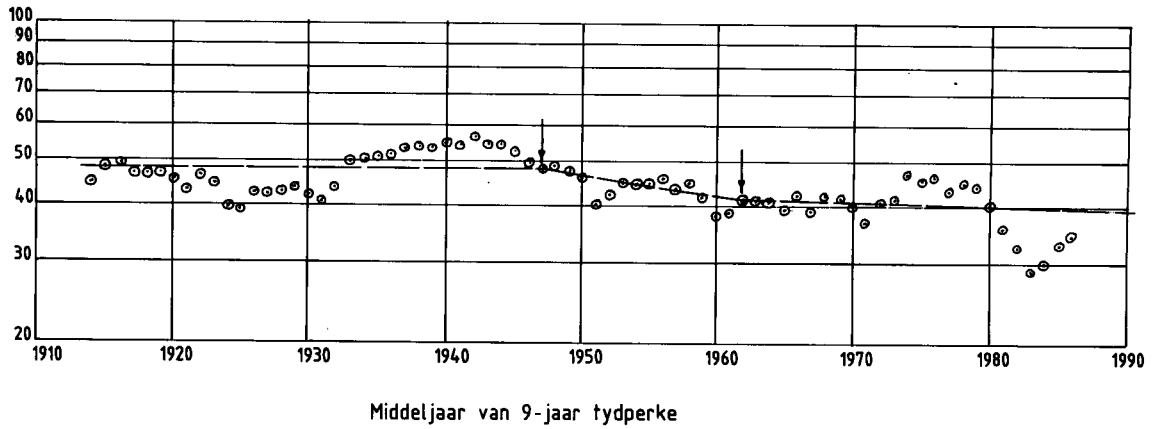
R' = 669,5 mm, die langtermyn gemiddelde reënval.

Hierdie waardes vir Q' is bereken vir elke gekose jaartydperk van 1924 tot 1990. Om die wisseling vir jaarlikse waardes tot 'n mate uit te stryk is die gemiddelde vir elke 9 jaar bereken, d.w.s. vir helfte van die benaderde ossilasietydperk vir reënval volgens Tyson (1986). Die nege-jaar gemiddelde waardes word in Fig. 8 teenoor die middeljaar vir elke 9-jaar tydperk aangetoon. Lyne wat by benadering die wisseling in afloop oor die jare aandui is in Fig. 8 ingeteken. Volgens hierdie lyne het die jaarlikse afloop wat verwag kan word met die langtermyn gemiddelde reënval verminder met 12,9% van 47,41 mm in 1947 tot 41,3 mm in 1962 en daarna met nog 4,1% tot 39,6 mm in 1986. Die stadiger tempo van vermindering oor die laaste 24 jaar hou waarskynlik verband met die toepassing van beheer oor wateronttrekkings ná die proklamering van die Vaaldam-opvanggebied as 'n Staatswaterbeheergebied in Julie 1970.

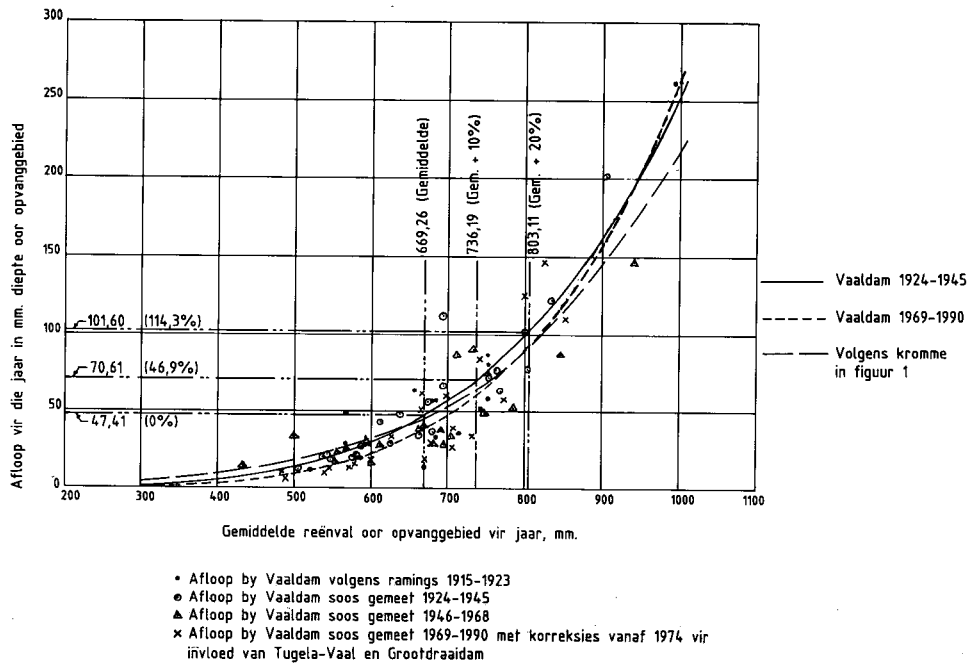
10. Verhoging in jaarlikse afloop met 'n verhoging in die jaarlikse reënval

Die jaarlikse reënval- en afloopgegewens vir die hele tydperk Oktober 1909 tot September 1991 is op natuurlike skaal uitgestip in Fig. 9. Die krommes vir Vgls. 1 tot 3 en 4 tot 6 afgelei vir die tydperke 1923 tot 1945 en 1969 tot 1990 respektiewelik is in Fig. 9 ingeteken, sowel as die kromme wat ooreenstem met die een in Fig. 1 vir die gemiddelde jaarlikse reënval en afloop vir bykans 275 opvanggebiede versprei oor Suid-Afrika. Die vergelyking vir laasgenoemde kromme in dieselfde vorm as Vgls. 2 en 5 is by benadering:

9-Jaar gemiddeldes in mm diepte oor opvanggebied van 38 638 km² vir ekwivalente afloop vir reënval van 669,26 mm per jaar



Figuur 8
Vaaldam opvanggebied: 9-jaar gemiddeldes vir afloop-ekwivalente vir gemiddelde jaarlikse reënval



Figuur 9
Jaarlikse reënval en afloop. Natuurlike skale

$$Q = \frac{R^{3,8}}{10^{9,0}} \quad (8)$$

Volgens die figuur is dit opvallend hoe goed hierdie kromme ooreenkom met die twee krommes vir die jaarlikse gegewens van die Vaalrivier-opvanggebied by Vaaldam. Dit is duidelik dat daar 'n dergelike verband bestaan tussen die jaarlikse reënval en afloop vir die enkele opvanggebied van Vaaldam as vir die gemiddelde waardes van riviere in Suid-Afrika as geheel, d.w.s. dat die afloop relatief veel vinniger toeneem as die reënval.

Hierdie neiging word geïllustreer deur die waardes in Tabel 7 van die persentasieverhogings in afloop vir verhogings van 10% en 20% in die reënval soos bereken op basis van Vgls. 2, 5 en 8.

Die gegewens in Tabel 7 dui aan dat dit redelikerwys verwag kan word dat 'n verhoging van 10% in 'n jaar se reënval sou lei tot 'n verhoging van tussen 40% en 60% in die afloop, en dat 'n verhoging van 20% in die jaar se reënval 'n verhoging van tussen 100% en 150% in afloop, d.w.s. 'n verdubbeling of meer in afloop, tot gevolg sal hê.

Daar moet op gewys word dat hierdie afleidings gemaak is op basis van 'n groot wisseling in die aard van reënvalvoorkomste

TABEL 7
VERHOOGING IN AFLOOP VIR BEPAALDE VERHOOGINGS IN REËNVAL

Verhoging in jaarlikse reënval	Persentasie verhoging in afloop		
	Vgl. 2 vir tydperk 1924-45 by Vaaldam	Vgl. 5 vir tydperk 1969-90 by Vaaldam	Vgl. 8 vir gemiddelde jaarlikse gegewens vir SA riviere
%	%	%	%
10	49,0	60,2	43,6
20	114,3	146,4	99,9

oor die opvanggebied van Vaaldam en van 'n groot getal opvanggebiede met 'n wye verskeidenheid in eienskappe vir Suid-Afrika as geheel. Ten spyte daarvan het al die beskikbare resultate een eienskap in gemeen, d.w.s. dat daar 'n sterk aanduiding is dat die jaarlikse afloop baie vinniger toeneem as die jaarlikse reënval. Alhoewel afwykings in hierdie algemene strekking mag voorkom, soos trouens ook afgelei kan word van die speling in die gegewens wat gebruik is, kom dit as waarskynlik voor dat daar 'n dergelike neiging sal wees met 'n verhoging in reënval deur kunsmatige stimulering.

11. Implikasies van 'n verhoging in reënval

- 11.1 Die verhogings in afloop met verhoogde reënval soos afgelei in die vorige afdeling is gebaseer op jaarlikse toestande en sal nie noodwendig van toepassing wees op enkele reënvalvoorkomste nie.
- 11.2 As die jaarlikse reënval met 20% verhoog kan word sou die jaarlikse afloop bykans verdubbel word, maar dit sou die hoeveelheid waterdamp wat weer uitwaai oor die grense van Suid-Afrika met slegs sowat 1% verminder. Die invloed op die globale sirkulasie van waterdamp in die atmosfeer behoort dus minimaal te wees.
- 11.3 Die ooreenstemming van die kromme in Fig. 9 vir die gemiddelde jaarlikse reënval en afloop vir 'n groot aantal opvanggebiede in Suid-Afrika as geheel met die twee krommes vir die Vaalrivier bokant Vaaldam dui daarop dat 'n dergelike verband tussen reënval en afloop vir die land as geheel bestaan. As dit korrek is, sou ook verwag kan word dat 'n verhoging van 20% in die reënval vir die land as geheel sou lei tot feitlik 'n verdubbeling in die afloop van die riviere. Dit sou uit die oogpunt van watervoorsiening van onskatbare waarde wees vir 'n waterarm land soos Suid-Afrika.
- 11.4 Benewens die groot waarde van 'n verhoging in afloop sou 'n 20% verhoging in die reënval ook daartoe lei dat die oppervlaktes wat geskik is vir akkerbou en bosbou aansienlik vergroot kan word. Dit sal die vermoë van die land om sy groeiende bevolking te voed en te versorg aansienlik versterk.
- 11.5 Met 'n verhoogde reënval van 20% sou die Karoo weswaarts verplaas word, maar in die baie droë dele van die land waar die reënval minder as 125 mm per jaar is sou die invloed van so 'n verhoging van

reënval minimaal en miskien selfs weglaatbaar klein wees. Die invloed op die ekologie as geheel behoort dus gering te wees.

- 11.6 'n Verhoogde afloop sou die nadele van waterbesoedeling in ons riviere aanvanklik sterk verminder maar stappe sal betyds gedoen moet word om onaanvaarbare vlakke van besoedeling in die toekoms, met 'n toename in watergebruik, te verhoed.
- 11.7 As die afloop van die Vaalrivier verdubbel kan word sou die leweringsvermoë vir benutting ook verdubbel kon word met addisionele opgaring, maar met slegs die bestaande opgaardamme sou ongeveer 50% meer water uit die Vaalrivier self gelewer kan word, d.w.s. genoeg om te voorsien in die toename in gebruik vir ongeveer 9 jaar. Dit sou beteken dat 'n waterprojek soos die Lesotho Hooglandprojek vir 9 jaar uitgestel kan word. Teen 'n kapitale koste van R5 000 miljoen vir hierdie projek sou so 'n uitstel kon lei tot 'n opgelope besparing oor 9 jaar van bykans R7 000 miljoen slegs aan rente, bereken teen 15% per jaar. Daar kan geen sprake van wees om die Lesotho Hooglandprojek uit te stel nie maar dit sal na 2010 opgevolg moet word deur 'n volgende projek teen moontlik 'n nog hoër koste. Hierdie benaderde raming illustreer dat uit die oogpunt van watervoorsiening enorme besparings moontlik sal wees, indien dit prakties uitvoerbaar sou wees om die reënval met 20% te verhoog. Vir die land as geheel sou die voordeel nog veel groter wees.
- 11.8 Weens die aard van die lewering van water uit opgaring vir bestendige gebruik sal die voordeel van verhoogde afloop met 'n verhoging in reënval die grootste wees as die reënval en afloop in droë jare relatief meer verhoog kan word as in nat jare. Dit sou geen sin hê om die afloop te verhoog in tydperke wanneer die opgaardamme reeds oorloop nie.
- 11.9 As 'n kunsmatige verhoging in die reënval prakties uitvoerbaar bevind word, sou een van die groot voordele daarvan wees dat die ekstra water gelewer kan word in die gebiede waar dit benodig word.

12. Gevolgtrekkings

- 12.1 In die 81 jaar van 1909 tot 1990 was daar geen noemenswaardige verandering in die reënvalpatroon vir die Vaalrivier-opvanggebied bokant Vaaldam nie.
- 12.2 Afgesien van die uitwerking van groot projekte soos die Tugela-Vaal Projek en Grootdraaidam was daar sedert ongeveer 1948 'n vermindering in die afloop in verhouding tot die reënval van die Vaalrivier by Vaaldam. Dit word toegeskryf aan verhoogde gebruik vir dorpe in die opvanggebied en vir besproeiing deur oewerbewoners. Die vermindering in afloop wat ooreenkom met die langtermyn-gemiddelde reënval word geraam op sowat 16,5% van 1948 tot 1986, maar dit kom voor dat daar oor die laaste 20 jaar 'n afname in die tempo van vermindering in die afloop was, waarskynlik as

- gevolg van beheer oor die onttrekking van water.
- 12.3 Alhoewel daar 'n groot speling in waardes is, is daar tog 'n neiging vir die getal reëndae en die gemiddelde reënval per reëndag om hoër te wees in nat jare as in droë jare. Dit dra waarskynlik by tot die vinniger toename van afloop in verhouding tot reënval.
 - 12.4 Daar is 'n besliste neiging vir die verdampingspotensiaal om laer te wees in nat as in droë jare. Dit is ook 'n faktor wat afloop vinniger laat toeneem as reënval.
 - 12.5 Vir die Vaaldam-opvanggebied wissel die maande met minimum reënval en afloop vanaf Mei tot Oktober, met die grootste getal voorkomste in Julie en Augustus. Daarvolgens sou die logiese keuse van 'n hidrologiese jaar vir hierdie opvanggebied wees van Augustus tot Julie in plaas van die algemeen aanvaarde een vir Suid-Afrika as geheel, nl. Oktober tot September.
 - 12.6 Die belangrikste gevolgtrekking is ongetwyfeld dat 'n verhoging van die jaarlikse reënval oor die Vaaldam-opvanggebied waarskynlik die jaarlikse afloop met 'n baie groter persentasie sou verhoog. Vir 'n verhoging van 10% in die reënval sou die afloop waarskynlik met ongeveer 50% verhoog word en met 'n verhoging van die reënval met 20% is 'n verdubbeling van die afloop moontlik. Hierdie bevindings vir die Vaalrivier-opvanggebied word ondersteun deur die gemiddelde jaarlikse waardes vir reënval en afloop van 275 opvanggebiede versprei oor die hele Suid-Afrika
 - 12.7 Die potensiële voordele van 'n verhoging in die reënval om die afloop van ons riviere te verhoog is so groot dat uitgebreide navorsing oor die moontlikheid van kunsmatige stimulering van reënval as van die hoogste prioriteit beskou moet word. Die verhoging in reënval met soveel as 20% sou moontlik die afloop van ons riviere verdubbel en ook baie ander voordele meebring, maar sal waarskynlik baie min invloed hê op Suid-Afrika se ekologie as geheel.

13. Dankbetuigings

'n Besondere woord van dank gaan aan Steve Lynch van die Departement Landbou-ingenieurswese aan die Universiteit van Natal te Pietermaritzburg vir die berekening van maandelikse en jaarlikse reënvalgemiddeldes oor die Vaaldam-opvanggebied. Ek wil ook graag my waardering uitspreek teenoor die volgende:

Dr. GC Green van die Waternavorsingskommissie en dr. MC Dent van die Rekensentrum vir Water, Pietermaritzburg vir reëlins om die reënvalberekenings te laat doen, Mnr. S van Biljon, mnr. RD McDonald, mev. IDJ Gouveia en ander personeel van die afdeling Hidrologie van die Departement van Waterwese vir die beskikbaarstelling van afloop- en verdampings-gegewens en die aanpassing van die afloop by Vaaldam om die invloed van die Tugela-Vaal Projek en van Grootdraaidam in ag te neem.

My seun mnr. KJ Kriel, vir die berekenings en ontledings vir die kleinste-kwadraat-fout-vergelykings van reënval en afloop.

Personeel van die Weerburo vir die beskikbaarstelling van reënvalgegewens vir die jare 1986 tot 1990.

Mevv. D Angelopolou, S Pieterse en E Meyer, deelydse

sekretaresse, vir verwerking van gegewens en tikwerk.
Mev. S Lamprecht vir natrek van die grafieke.

14. Verwysings

- BARKER, HMG and WHITMORE, JS (1965) Correlation of Evaporation from Symons and Storage Reservoirs. Div. of Hydrol. Res. Tech Note 16.6, Department of Water Affairs, Pretoria.
- BOSMAN, HH (1990) Methods to convert American Class A-pan and Symon's tank evaporation to that of a representative environment. *Water SA* 16(4) 227-236.
- DEPARTEMENT VAN WATERWESE (1989) Direktoraat Hidrologie. State van leweringontledings vir Vaaldam. Persoonlike mededelings.
- DEPARTEMENT VAN WATERWESE (1985a) Lys van reservoirs. Hidrografiese Opmeting Verslag No. S/HOO1 Pretoria.
- DEPARTEMENT VAN WATERWESE (1985b) Verdampings- en neerslagrekords. Maandelikse data tot September 1980. Hidrologiese Inligting Publikasie No. 13, Pretoria.
- DEPARTEMENT VAN WATERWESE (1990) Aanvullende tabelle van verdampingsgegewens Okt. 1980 tot Sept. 1988. Persoonlike mededeling.
- DEPARTEMENT VAN WATERWESE (1991) Aanvullende afloopgegewens vir Vaaldam. Persoonlike mededeling.
- DEPARTEMENT VAN WATERWESE (1964) Maandelikse vloeierekords van meetstasies tot September 1960. *Hidrografiese Opmeting* (8)8.
- DEPARTEMENT VAN WATERWESE (1986) Bestuur van die Waterhulpbronne van die Republiek van Suid-Afrika. Hoofstukke 2 en 3.
- DU PLESSIS, JG en VAN ROBBROECK, TPC (1978) Toekomstige waterbehoefte van Suid-Afrika. SA Genootskap vir die Bevordering van Wetenskap. *Handelinge van die Twee-jaarlikse kongres "Die Toekoms van Suid-Afrika"*. Stellenbosch. Vol. 1.
- GRANGER, RJ (1989a) An examination of the concept of potential evaporation. *J. Hydrol.* 117 9-19. Elsevier Amsterdam.
- GRANGER, RJ (1989b) A complementary relationship approach for evaporation from nonsaturated surfaces. *J. Hydrol.* 1 31-38, Elsevier Amsterdam.
- GRANGER, RJ and GRAY, DM (1989) Evaporation from natural nonsaturated surfaces. *J. Hydrol.* III 21-29. Elsevier Amsterdam.
- GREEN, GC (1989) Atmospheric water for the future. *Civil Engineer in SA*. SAICE Oct. 1989.
- KRIEL, JP (1983a) The Occurrence and Beneficial Use of Water in South Africa. *RSA 200* 5 27-39, HSRC Pretoria.
- KRIEL, JP (1983b) Atmosferiese Waterdamptransport oor Suid-Afrika in Verhouding tot die Reënval en die Benutbare Waterbronne: 'n Voorlopige Raming. Verslag aan die Waternavorsingskommissie.
- KRIEL, JP (1963) Recent Investigations on the Evaporation from Large Water Surfaces and Evaporation Tanks in South Africa. Tech. Report No. 29, Hidrol. Res. Div., Department of Water Affairs, Pretoria.
- LYNCH, S (1990) Tabulations of mean rainfall over the Vaal River catchment at Vaal Dam from 1909 to 1986 calculated from data at the Computing Centre for Water Research, Pietermaritzburg. Department of Agricultural Engineering, University of Natal. Personal communications.
- MIDGLEY, DC, PITMAN, WV en MIDDLETON, BJ (1981) *Surface Water Resources of South Africa*. Report Series HRV 8/81 to 13/81. Vol. I to VI, Part 2. University of the Witwatersrand.
- MC GEE, OS (1982) Precipitable Water over South Africa 1982. Verslag aan die Waternavorsingskommissie.
- NASH, JE (1989) Potential evaporation and the complementary relationship. *J. Hydrol.* III 1-19. Elsevier, Amsterdam.
- PALING, WAJ, STEPHENSON, D and JAMES, CS (1989) Modular Rainfall - Runoff and Erosion Modelling. Water Systems Research Group, Dept. of Civ. Eng., University of the Witwatersrand. Report No. 1189. 24-39.
- PITMAN, WV (1973) A Mathematical Model for Generating Monthly River Flows from Meteorological Data in South Africa. Hydr. Res. Unit, University of the Witwatersrand. Report No. 2/73, 2.1-2.17.
- TALJAARD, JJ and STEYN, PCL (1988) Relationships Between Rainfall, Runoff and Weather Systems in the Catchment of the Vaal Dam. Weerburo, Departement van Omgewingsake. Tegnieuse Verhandeling No. 20 4,8,9 en 15.

TYSON, PD (1986) Climatic Change and Variability in Southern Africa. Oxford University Press. 12 68-80.
WEERBURO, DEPT. VAN VERVOER (1965) Gemiddelde maandelikse reënval tot op die end van 1960. *Klimaat van Suid-*

Afrika. Deel 9 WS 29. Staatsdrukker Pretoria.
WEERBURO, DEPT. VAN OMGEWINGSAKE (1988) Bethlehem Precipitation Research Project. Progress Report for 1987-88.
