

Abteilung I — Binnenschifffahrt

Thema 4

Erzielte Fortschritte in der Vorhersage des Abflusses und insbesondere von Niedrigwasser und Hochwasser. Maßnahmen zur Verbesserung des Niedrigwasser-Abflusses und zur Verringerung des Hochwasser-Abflusses

von

Dipl.-Ing. Walter B e n s i n g, Regierungsbaudirektor, Wasser- und Schiffahrtsdirektion Freiburg; Dr.-Ing. Heinz G r a e w e, Präsident, Wasser- und Schiffahrtsdirektion Freiburg; Dipl.-Ing. Wolfgang K e l b e r, Regierungsbaurat, Wasser- und Schiffahrtsdirektion Freiburg; Dipl.-Phys. Hermann G. M e n d e l, Regierungsrat, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.

Zusammenfassung

Die Notwendigkeit einer mehrtägigen Niedrigwasservorhersage besteht im schiffbaren Rheingebiet, insbesondere für den Abschnitt Bingen—St. Goar, also für den Pegel Kaub, wo sich der Rhein in vielen Windungen durch das Rheinische Schiefergebirge genagt hat. Die Verwendung der linearen mehrfachen Regression hat sich dabei als brauchbares Verfahren erwiesen; die Vorhersage bis 78 Stunden kann als gut, bis etwa 5 Tage als ausreichend bezeichnet werden. Hauptnutznieser sind die Schifffahrt (optimale Ausnutzung des Kahnraumes), aber auch die Wasserkraftnutzer. Grundvoraussetzung für brauchbare Ergebnisse ist die sorgfältige Auswahl der Ausgangsstationen sowie der zu untersuchenden Abflußereignisse. Die Regressionskoeffizienten können mit Hilfe gebräuchlicher und an allen größeren Rechenzentren vorliegender Computerprogramme bestimmt werden. Ausgangsdaten und Regressionskoeffizienten liefern über die Regressionsgleichung die Vorhersagegrößen. Ein einfacher Tischrechner ist dafür ausreichend. Die Vorhersagen können nach Durchgabe der 7.00-Uhr-Niederschlagsmessungen erfolgen, liegen also am frühen Vormittag vor.

Zweck und Ziele und die technischen Möglichkeiten einer Verbesserung des Niedrigwasserabflusses schiffbarer Flüsse im Interesse der Schifffahrt, der Krafterzeugung, der Wasserqualität und der Wassertemperatur sowie der Sicherstellung von Verbrauchs- und Gebrauchswasser werden geschildert. Eine Anwendung der beschriebenen Möglichkeiten, vor allem im Schifffahrtsinteresse, wird seit langem an der Weser mit Hilfe der Edertalsperre praktiziert. Bei den Planungen für den Neckar und den Rhein spielt eine künftige Bodenseeregulierung eine entscheidende Rolle.

Weiter werden Zwecke und Ziele einer Verringerung des Hochwasserabflusses aus der Sicht der verschiedenen Wassernutzungen dargelegt, wobei gleichzeitig auf die gegenseitige Beeinflussung von Wassernutzung und Hochwasser eingegangen wird. Die verschiedenen möglichen Maßnahmen zur Verringerung des Hochwasserabflusses werden behandelt unter Hinweis auf die Verhältnisse am Rhein, wo zur Zeit eingehende Untersuchungen mit diesem Ziel im Gange sind. Auf Notwendigkeit und die Möglichkeiten einer Koordinierung verschiedener Retentionsmaßnahmen wird eingegangen.

Inhalt

	Seite
1. Niedrigwasservorhersage für den Rhein nach der Multiregressionsanalyse	90
1.1. Problemstellung	90
1.11. Die Situation der Rheinschifffahrt bei Niedrigwasser	90
1.12. Die hydrologischen Regime im Flußgebiet des Rheins oberhalb von Kaub (Abb. 1)	90
1.2. Verfahren zur Abflußvorhersage	92
1.3. Grundlagen der Multiregressionsanalyse	92
1.4. Hydrologische Gesichtspunkte bei der Anwendung der Multiregressions- analyse zur Niedrigwasservorhersage am Pegel Kaub	93
1.5. Auswahl der Daten und der Variablen	93
1.6. Ergebnisse der Rechnung	94
1.7. Beurteilung der Genauigkeit	95
2. Maßnahmen zur Verbesserung des Niedrigwasserabflusses	97
2.1. Zweck und Ziele einer Verbesserung des Niedrigwasserabflusses	97
2.11. Schifffahrtsinteresse	97
2.12. Kraftwerksinteresse	97
2.13. Verbesserung der Wasserqualität	97
2.14. Verhinderung unzulässiger Erwärmung durch Kühlwassereinleitungen	98
2.15. Sicherstellung von Verbrauchs- und Gebrauchswasser	98
2.16. Koordinierung verschiedener Interessen	98
2.2. Möglichkeiten der Verbesserung des Niedrigwasserabflusses	99
2.21. Schaffung künstlicher Speicherbecken im Einzugsgebiet	99
2.22. Regulierung natürlicher Seen	99
2.23. Überleitung von Wasser aus anderen Einzugsgebieten	99
2.24. Wasserabgabe aus staugeregelten Flußstrecken	100
2.25. Mehrzweckprojekte	100
2.3. Beispiele	100
2.31. Weser	100
2.32. Neckar	100
2.33. Rhein	100
3. Maßnahmen zur Verringerung des Hochwasserabflusses	104
3.1. Zweck und Ziele einer Verringerung des Hochwasserabflusses	104
3.11. Schifffahrtsinteresse	104
3.12. Kraftwerksinteresse	105
3.13. Wasserqualität	106
3.14. Verbrauchs- sowie Gebrauchswasser	106
3.2. Möglichkeiten von Maßnahmen zur Verringerung des Hochwasserabflusses, Hinweise auf den Rhein als Beispiel	106

	Seite
3.21. Natürliche Seen	107
3.22. Regulierte Seen	107
3.23. Künstliche Seen	107
3.24. Flußstrecken mit Stauregelung	108
3.3. Die Koordinierung verschiedener Maßnahmen durch den Betrieb der Stau- regelung am Oberlauf bei sehr großem Hochwasser	110
3.31. Notwendigkeit der Koordinierung	110
3.32. Möglichkeiten der Koordinierung	110
3.33. Probleme bei der Einführung des Kippbetriebes und ihre Lösungs- möglichkeiten	112
3.34. Weitere Voraussetzungen für die Koordinierung verschiedener Maß- nahmen durch Kippbetrieb	113

1. Niedrigwasservorhersage für den Rhein nach der Multiregressionsanalyse

1.1. Problemstellung

1.1.1. Die Situation der Rheinschifffahrt bei Niedrigwasser

Von der gesamten schiffbaren Strecke Rotterdam-Basel stellt der Abschnitt zwischen Bingen und St. Goar bei Niedrigwasser den eigentlichen Engpaß dar. Hier hat sich der Strom während der Hebung des Rheinischen Schiefergebirges tief eingeschnitten und so einen engen gewundenen Lauf mit felsiger Sohle und zahlreichen Untiefen geschaffen. Es leuchtet daher ein, für eine Niedrigwasservorhersage den Bezugspegel (Richtpegel) Kaub zu wählen, der bei km 550 mitten in dieser Einbruchstelle liegt und für den langjährige zuverlässige Abflußregistrierungen vorliegen.

Während eine Hochwasservorhersage für die Schifffahrtsstraßen im deutschen Rheingebiet nach dem Verfahren der Pegelbezugslinien von den Wasser- und Schifffahrtsdirektionen herausgegeben wird, ist die Schifffahrt in Perioden mit Niedrigwasserführung auf sich selbst gestellt; und zwar steht den Mitgliedern des Vereins zur Wahrung der Rheinschifffahrtsinteressen eine vergleichsweise grobe, lediglich auf Erfahrungswerten beruhende Vorhersage zur Verfügung. Die folgende Abschätzung mag einen Eindruck davon geben, daß mit einer präzisen Vorhersage eine günstigere Abladung der Schiffe und folglich auch eine erhebliche Kostenersparnis verbunden ist.

1. 600 beladene Schiffe/Tag (3-Tagesfahrt Emmerich-Mannheim)
2. 50 Tage Schifffahrtsbeschränkung im Jahr durch Niedrigwasser
3. 5 cm Verbesserung der Vorhersage durch ein mathematisches Modell
4. Frachtsatz: 5 DM/t und Tag

Folgerung: 1 cm Tiefgang/Tonne bedeuten 200 000 t zusätzliche Transportleistung/Jahr und cm, also 1 Mio t/Jahr, was einem Gewinn von

5 Mio DM/Jahr

entspricht.

1.1.2. Die hydrologischen Regime im Flußgebiet des Rheins oberhalb Kaub (Abb. 1)

Den Haupteinfluß auf die Menge und Verteilung der Niederschläge üben die vertikale Gliederung und der vielgestaltige Gebirgsbau aus: Im Süden, etwa bis zum Pegel Basel

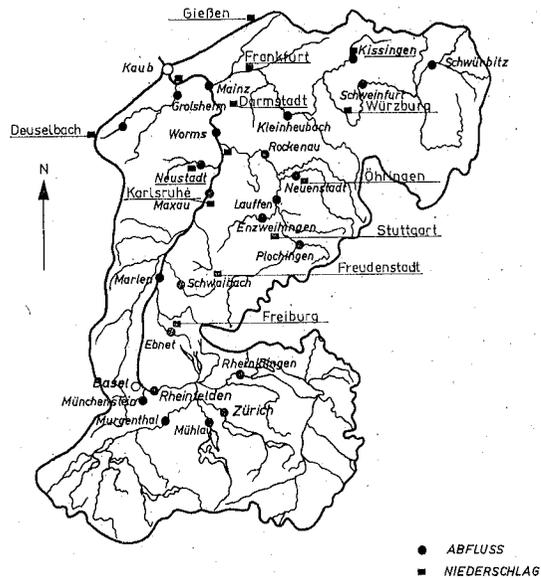


Abb. 1: Das Einzugsgebiet des Rheins oberhalb Kaub mit den verwendeten Niederschlags- und Abflußstellen. 1 : 3 Mio.

(34,550 km²), die Alpen und das Alpenvorland, von Basel bis Kaub (103 729 km²) in Flachlandzonen eingebettetes Mittelgebirge. Entsprechend fällt der mittlere Jahresniederschlag recht unterschiedlich aus; er beträgt im Mittellandgebiet von Neckar und Main ca. 600 mm und steigt in den Alpenrandgebieten auf über 2000 mm.

Der Abfluß des Rheines zeigt bis Basel typischen Hochgebirgscharakter mit geringem Abfluß im Herbst und Winter und großem Abfluß im Sommer (Niederschläge + Schneeschmelze). Obwohl das Einzugsgebiet nur ca. 1/3 des Gesamtniederschlagsgebietes bis Kaub ausmacht, führt der Rhein bis Basel im Jahresdurchschnitt bereits 65 % des Abflusses bei Kaub. Die im Alpengebiet liegenden Stauanlagen und Seen wirken zusammen mit dem Bodensee besonders bei Hochwasser ausgleichend auf den Abfluß.

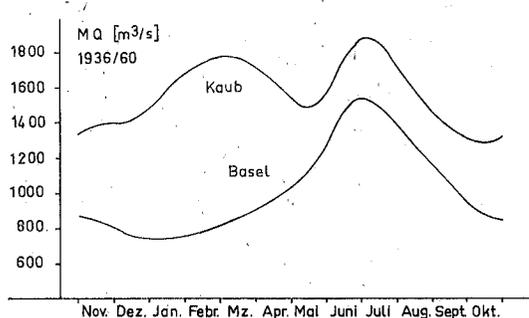


Abb. 2: Die mittleren Monatsabflüsse der Jahresreihe 1936/60 für den Rhein bei Basel und Kaub

Durch den Zutritt der Mittelgebirgsflüsse (aus dem Schwarzwald kommende Nebenflüsse, Neckar, Main und Nahe), die den größten Abfluß im Winter und Frühjahr, den geringsten Abfluß im Sommer und Herbst aufweisen, verändert sich das Abflußverhalten des Rheins. Die jahreszeitliche Verteilung und die Größenordnung der Abflüsse der einzelnen Teilgebiete geht aus Abb. 2 hervor. Das Zusammenwirken von Hochgebirgsabflüssen und Mittelgebirgsabflüssen bringt dem Rhein bei Kaub einen ausgeglichenen Abfluß. Das Verhältnis des Abflusses bei NNW zu dem bei HHW beträgt etwa 1 : 14. Die niedrigsten Abflüsse ereignen sich im jährlichen Rhythmus meist in den Herbstmonaten. Anschwellungen im Niedrigwasserbereich werden überwiegend von den Mittelgebirgsflüssen verursacht.

1.2. Verfahren zur Abflußvorhersage

Während man sich bis in die ersten Jahrzehnte dieses Jahrhunderts bei der hydrologischen Prognose mit empirischen Faustformeln zufriedengab, oder gar auf die meist richtige, aber wenig informative Gleichung

$$\text{vermehrter Niederschlag gleich vermehrter Abfluß}$$

zurückgriff, so wurde in neuerer Zeit eine Vielzahl von mathematischen Verfahren entwickelt, die die Ausgangsdaten wie Niederschlag und Kennwerte des Einzugsgebietes in einen quantitativen Zusammenhang mit dem Abfluß am Vorhersagepegel bringen. Grundsätzlich unterscheidet man dabei die sog. deterministischen Verfahren (parametrische Hydrologie), die den Weg des Wassers nach physikalischen Gesetzmäßigkeiten im Boden und im Gerinne verfolgen (z. B. flood routing und unit hydrograph), und die statistischen Verfahren (probabilistische und stochastische Hydrologie). Dabei werden die Zusammenhänge zwischen mehreren Variablen mit Hilfe der mathematischen Statistik beschrieben, ohne auf irgendwelche Kausalitätsbeziehungen zu achten. Zur Gruppe dieser Verfahren zählt auch die hier angewandte *Multiregressionsanalyse* (mehrfache lineare Regression).

1.3. Grundlagen der Multiregressionsanalyse

Die einfachste Regressionsgleichung

$$Y = a \cdot X \quad (1)$$

sagt aus, daß zwischen der unabhängigen Variablen X und der abhängigen Variablen Y ein linearer Zusammenhang besteht. Ist Y von mehreren Variablen X_1, X_2, \dots, X_n linear abhängig (multiple lineare Regression), so ist (1) sinngemäß zu erweitern:

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_n X_n \quad (2)$$

Die a_0, a_1, \dots, a_n sind dabei Regressionskoeffizienten, die aus vorliegenden Meßreihen, hier also aus zurückliegenden Abflußereignissen, etwa nach der Methode der kleinsten Quadrate, zu bestimmen sind. Dieses Rechenschema zählt heute zu den gebräuchlichsten Methoden der angewandten Mathematik [2], es darf daher als bekannt vorausgesetzt werden. Dasselbe gilt für die Prüfung der Güte der Regression, z. B. über den Korrelationskoeffizienten k oder die Standardabweichung s. Diese ist definiert als Quadratwurzel der Varianz

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (3)$$

mit

n = Anzahl der Fälle = Freiheitsgrad + 1

y_i = Werte der Beobachtungsreihe

\bar{y} = Mittelwert der y_i

s ist ein Maß für die Streuung der Einzelwerte um ihr Mittel. Aus Tabellen läßt sich die Güte der Anpassung ablesen; der Zusammenhang gilt bei einer vorgegebenen Sicherheitswahrscheinlichkeit (meist 95 %) als gesichert, wenn die berechnete Streuung den Tabellenwert nicht überschreitet. Parameter ist dabei der Freiheitsgrad.

Zur Bestimmung der Regressionskoeffizienten stehen getestete Computerprogramme zur Verfügung. Im vorliegenden Fall wurde das FORTRAN Bibliotheksprogramm BMD 02 R des DRZ in Darmstadt benutzt, das in [3] veröffentlicht ist. Kennt man die Regressionskoeffizienten, so läßt sich die abhängige Variable Y in (2) nach Vorgabe der unabhängigen Variablen X_i ($i = 1, 2, \dots, n$) per Hand oder mit einem kleinen Tischrechner bestimmen. Daraus erkennt man, daß das Verfahren der Multiregressionsanalyse in der Hydrologie sehr leicht und schnell anzuwenden ist und nicht, wie das bei den bekannten deterministischen Verfahren der Fall ist, den Einsatz einer elektronischen Großrechenanlage benötigt.

1.4. *Hydrologische Gesichtspunkte bei der Anwendung der Multiregressionsanalyse zur Niedrigwasservorhersage am Pegel Kaub*

Das Einzugsgebiet des Rheins wird als stochastisches System behandelt. Abhängige Variable (Vorhersagegröße) im Sinne der Gleichung (2) ist der Abfluß Kaub, unabhängige Variablen (Ausgangsvariablen) sind in erster Linie Abflüsse (jeweils Tagesmittel), aber auch Abflußänderungen, Niederschläge, Bodenfeuchtwerte, Grundwasserstände und Beschaffenheit der Schneedecke an ausgewählten Stellen im Einzugsgebiet (s. Abb. 1). Die Wahl dieser Meßstellen ist abhängig von der Vorhersagezeit; sie soll z. B. bei Verwendung von Abflüssen in erster Linie mit der mittleren Fließzeit bis zum Vorhersagepegel übereinstimmen; da aber ein längerer Abschnitt der Ganglinie vorherzusagen ist, wird man auch Pegel mit kürzerer und längerer Fließzeit heranziehen. Andererseits wird die Anzahl der Meßstellen und der Variablen durch das Computerprogramm bei vorgegebener Genauigkeitsforderung bestimmt. So hat sich gezeigt, daß für die in die Herbstmonate September und Oktober fallenden und mit Abladebeschränkungen für die Schifffahrt verbundenen Niedrigwasserperioden Abflüsse (und damit Abflußänderungen) und Niederschläge die dominierenden Variablen sind, wohingegen die anderen Größen keine wesentliche Steigerung der Vorhersagegenauigkeit bringen. Darüber hinaus ist gerade von stochastischen Vorhersageverfahren bekannt, daß sie bereits mit wenigen Parametern brauchbare Ergebnisse liefern, daß aber darüber hinaus eine Verbesserung nur mit erheblicher Steigerung der Eingabegrößen und damit des Rechenaufwandes verbunden ist. Das gilt zwar weit mehr für die Hochwasser- als für die Niedrigwasservorhersage, eine Beschränkung ist aber auch hier notwendig.

1.5. *Auswahl der Daten und der Variablen*

Zur Bestimmung der Regressionskoeffizienten a_0, a_1, \dots, a_n in (2) wurden aus der Jahresreihe 1947 bis 1966 die Tage mit einem mittleren Tagesabfluß von weniger als $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ ausgewählt (Beschränkung der Abladetiefe bei weniger als 220 cm Wasserstand).

Die zu ermittelnden Regressionsbeziehungen sollen das durchschnittliche Abflußverhalten, das auch in der Zukunft erwartet wird, für den untersuchten Abflußbereich und für die ausgewählten Monate ausdrücken. Die gewählten Ausgangsdaten müssen daher das Durchschnittsverhalten repräsentieren. Um das Durchschnittsverhalten zu erfassen, müssen möglichst viele Fälle einbezogen werden. In den Monaten September und Oktober dieser Jahre wird der Abfluß $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ am Pegel Kaub an 965 Tagen, d. h. an 79 % aller Tage, unterschritten.

Für diese Zeit wurden nach den genannten Gesichtspunkten die Tageswerte von 25 Abflußmeßstellen, 14 Niederschlags- und 3 Grundwassermeßstellen in die Rechnung einbezogen; gleichzeitig damit sind auch die Abflußtendenz(-änderung) und die Bodenfeuchtigkeit an den genannten Pegeln bzw. Niederschlagsstationen festgelegt. Letztere läßt sich leicht in einer vereinfachten Form des bekannten Ante Precipitation Index (API) angeben:

$$\text{API} = k \cdot N_{-1} + k^2 \cdot N_{-2} + \dots + k^n \cdot N_{-n} \quad (4)$$

wobei $k \approx 0,9$ ist und N_{-1}, N_{-2}, \dots die Niederschläge an 1, 2, ... Tagen vor dem Vorhersagezeitpunkt bedeuten.

1.6. Ergebnisse der Rechnung

Die folgende Tabelle 1 enthält als Ergebnis der Rechnung die Regressionskoeffizienten und die Variablen der Regressionsgleichung (2) für die 1-, 2-, 3-, 4- und 5tägige Niedrigwasservorhersage am Pegel Kaub. In Tabelle 2 sind die im Computerprogramm benutzten Bezeichnungen erläutert; die Variablennamen gehen damit aus Abb. 1 hervor. Beispiel:

Der Abfluß am Pegel Kaub für den Vorhersagezeitraum $T = 3$ Tage ist

$$\begin{aligned} Q_{T_3} = & -1,092 + 0,594 \cdot \text{QKAUBO} + 0,235 \cdot \text{QRHEIN} + 0,147 \cdot \text{QMAXAU} + \\ & + 0,766 \cdot \text{QKISSI} + 0,188 \cdot \text{QSCHWA} + 4,409 \cdot \text{NKARLS} + \\ & + 4,128 \cdot \text{NKISSI} + 2,670 \cdot \text{NGEISE} + 1,373 \cdot \text{QLAUFF} + \\ & + 0,322 \cdot \text{CRHEIN} + 0,199 \cdot \text{CSCHWA} + 0,122 \cdot \text{AEBNET} + \\ & + 0,099 \cdot \text{DSCHWU} + 0,374 \cdot \text{DZUERI} - 0,689 \cdot \text{SKISSI} \end{aligned}$$

Tabelle 1: Regressionskoeffizienten und Variablen der Gleichung (2)

i	T = 1 Tag		T = 2 Tage		T = 3 Tage		T = 4 Tage		T = 5 Tage	
	a ₁	x ₁								
1	0,797	QKAUBO	0,711	QKAUBO	0,594	QKAUBO	0,454	QRHEIN	0,944	QMAXAU
2	0,122	QMAXAU	0,266	QMAXAU	0,235	QRHEIN	0,581	QMAXAU	1,345	QKISSI
3	0,072	QMAINZ	0,281	QKISSI	0,147	QMAXAU	1,204	QKISSI	0,526	QSCHWA
4	0,203	QSCHWE	0,100	QSCHWA	0,766	QKISSI	0,585	QSCHWA	4,242	NFREUD
5	0,554	NKARLS	2,487	NKARLS	0,188	QSCHWA	4,022	NSTUTT	4,023	NSTUTT
6	1,134	NFRANK	1,379	NFRANK	4,409	NKARLS	6,785	NKARLS	6,647	NKARLS
7	0,556	QLAUFF	1,658	NGIESS	4,128	NKISSI	3,751	NKISSI	3,602	NGIESS
8	-0,140	AMAXAU	0,849	QLAUFF	2,670	NGEISE	0,624	QKLEIN	0,696	QKLEIN
9	0,268	AWORMS	0,228	BMAXAU	1,373	QLAUFF	1,628	QLAUFF	-0,355	AMAXAU
10	-1,050	AKISSI	0,219	CRHEIN	0,322	CRHEIN	-1,086	QZUERI	-0,598	AWORMS
11	0,247	BMAXAU	0,252	AOBERS	0,199	CSCHWA	-0,294	AMAXAU	-0,194	CMAXAU
12	0,536	BKISSI	0,644	BLAUFF	0,122	AEBNET	-0,611	AWORMS	0,624	CSCHWA
13	0,088	AGROLS	0,034	CEBNET	0,099	DSCHWU	0,147	AEBNET	1,337	DMUEHL
14	0,271	AOBERS	0,097	DSCHWU	0,374	DZUERI	0,496	DMUEHL	1,292	DZUERI
15	0,480	AKLEIN	-0,152	SFREUD	-0,689	SKISSI	1,174	DZUERI	-0,525	SFREUD
a ₀	-1,966	—	6,246	—	-1,092	—	10,845	—	11,282	—

Tabelle 2: Bedeutung der in Tab. 1 benutzten Variablennamen

Bezeichnung	Bedeutung
Q	Abfluß m ³ /s
A	Abflußänderung gegenüber Vortag
B	Abflußänderung gegenüber vor 2 Tagen
C	Abflußänderung gegenüber vor 3 Tagen
D	Abflußänderung gegenüber vor 4 Tagen
N	Tagesniederschlag mm
U	Niederschlagssumme der verg. 3 Tage
V	Niederschlagssumme der verg. 5 Tage
W	Niederschlagssumme der verg. 7 Tage
S	N + U + V
M	S + W
NS	Niederschlagsindex (= großflächiger Gebietsniederschlag)

1.7. Beurteilung der Genauigkeit

Das durch (2) und (2 a) beschriebene durchschnittliche Abflußverfahren läßt infolge seines statistischen Aufbaus Abweichungen nach beiden Richtungen hin zu. Die Häufigkeitsverteilung dieser Abweichungen (Abb. 3) wird mit zunehmender Vorhersagezeit flacher, die Genauigkeit also erwartungsgemäß geringer. Als Kriterium für die Zuverlässigkeit der Aussage (2) sei das Streuungsverhältnis, eine Größe, die der Varianz (3) entspricht, über der Vorhersagezeit aufgetragen (Abb. 4). Man kann nach Erfahrungswerten damit die Vorhersage bis 78 Stunden als gut, bis etwa 5 Tage als ausreichend bezeichnen. Die tabellarische Darstellung (Tab. 3) läßt eine konkretere Aussage zu; z. B. liegen bei einer (nachträglichen) 3-Tages-Vorhersage 96 % aller Fälle im Bereich ± 10 cm Wasserstandsdifferenz, oder: bei einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95 % ist hier die Genauigkeitsgrenze ± 9 cm.

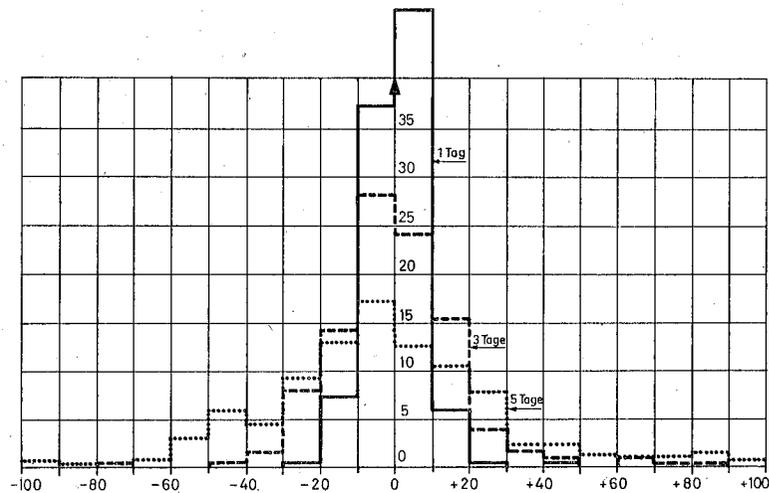


Abb. 3: Die Häufigkeitsverteilung der Abweichungen in %

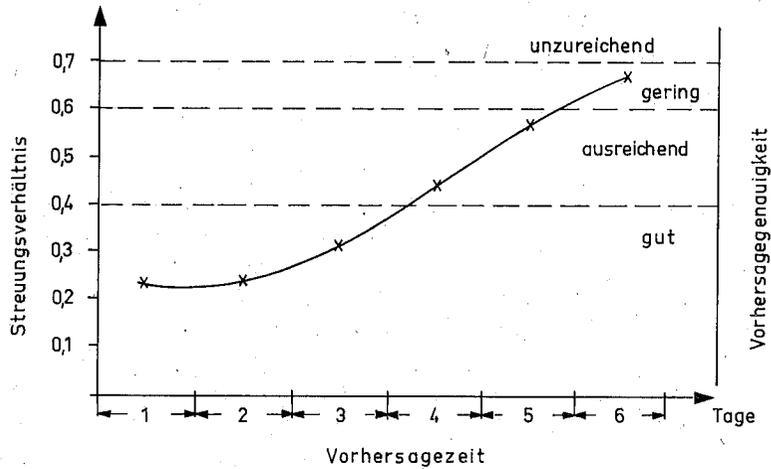


Abb. 4: Zur Vorhersagegenauigkeit

Tabelle 3:

Vorhersagezeit in Tagen	W ± 5 cm [%]	W ± 10 cm [%]	A 95 % [± cm]
1	99	99,9	3
2	95	99	5
3	83	96	9
4	65	85	15
5	50	75	21
6	42	65	26

Für die Schifffahrt gefährlich sind vor allem negative Abweichungen, bei denen der tatsächliche Abfluß kleiner ist als der Vorhersagewert. Wird die Abladetiefe nach dem Vorhersagewert ohne Sicherheitszuschlag festgelegt, kann ein Leichtern notwendig werden. Ein um einige Zentimeter zu niedrig vorhergesagter Wasserstand dagegen bedeutet keine Gefahr, er verringert nur den wirtschaftlichen Gewinn.

Die Genauigkeitsgrenzen verringern sich in diesem Fall um einige Zentimeter.

Eine wesentliche Steigerung der Vorhersagegenauigkeit wird zunächst in einer besseren Beurteilung der Bodenfeuchtigkeit zum Vorhersagezeitpunkt zu erwarten sein. Es ist naheliegend die einfachen Ausdrücke für die Niederschlagssummen der Vorhersage durch den erprobten API zu ersetzen. Darüber hinaus hat sich bei einer Vorhersage von mehr als 2 Tagen das Fehlen einer quantitativen Niederschlagsvorhersage als die dominierende Fehlerquelle herausgestellt. Bei der nach demselben Verfahren erstellten Kurzfristprognose für den Pegel Rheinfelden, die von der ETH Zürich herausgegeben wird [4], ist eine ständige quantitative Niederschlagsvorhersage eingebaut; hier muß jedoch das anders geartete hydrologische Regime während der Wintermonate berücksichtigt werden, auch liegen die Akzente bei der Hochwasservorhersage.

Im Gegensatz dazu ist eine Steigerung der Genauigkeit durch Erhöhung des Meßstellennetzes durch Übergang zu nichtlinearen Ansätzen in (2) nicht zu erwarten. Auch werden andere Variablenkombinationen nicht zu wesentlich besseren Ergebnissen führen.

2. Maßnahmen zur Verbesserung des Niedrigwasserabflusses

2.1. Zweck und Ziele einer Verbesserung des Niedrigwasserabflusses

2.11. Schiffsinteresse

Bei schiffbaren Flüssen kann eine Verbesserung des Niedrigwasserabflusses in erster Linie der Schifffahrt dienen, die im Falle freifließender Flüsse in Niedrigwasserzeiten unter geringen Fahrwassertiefen zu leiden hat. Die Fahrwassertiefen bestimmen die maximalen Abladetiefen der Schiffe, so daß in Zeiten geringer Wasserführung Abladebeschränkungen eine Herabsetzung des Ausnutzungsgrades größerer Schiffe zur Folge haben. Es ist selbstverständlich, daß aus Wirtschaftlichkeitsgründen die Größe der Schiffe und ihre maximalen Tauchtiefen nicht durch die ungünstigsten Abflußverhältnisse innerhalb einer bestimmten Zeitperiode begrenzt werden können. Daher müssen die auf einem natürlichen Gewässer verkehrenden Regelschiffe mehr oder weniger einschneidende Beschränkungen der Abladetiefen bei niedrigen Pegelständen in Kauf nehmen. Die Folgen sind ein zahlenmäßig größerer Einsatz von Schiffseinheiten, um nach Möglichkeit das anfallende Verkehrsaufkommen bewältigen zu können, und eine Erhöhung der Frachtsätze durch Kleinwasserzuschläge, wie es auf dem Rhein bei einem Pegelstand in Kaub unter 150 cm üblich ist. Es kann daher durchaus im volkswirtschaftlichen Interesse liegen, wenn in Zeiten niedriger Wasserführung die Fahrwassertiefen durch geeignete Maßnahmen verbessert werden, soweit dies mit wirtschaftlich vertretbaren Mitteln zu erreichen ist.

Aber nicht nur in freifließenden, sondern auch in staugeregelten Flüssen kann eine Verbesserung des Niedrigwasserabflusses erforderlich werden, wenn zeitweise das Schleusungswasser nicht mehr in ausreichender Menge zur Verfügung steht. Natürlich wird man bei Inangriffnahme der Arbeiten zur Stauregelung sich Gedanken über die Sicherstellung des Schleusenbetriebswassers gemacht haben. Es ist jedoch denkbar, daß durch eine Erhöhung des ursprünglich eingeplanten Verkehrsaufkommens die zu den Schleusungen benötigten Wassermengen den Niedrigwasserabfluß übersteigen. Hier dient dann eine Abflußanreicherung nicht zur Verbesserung der Abladeverhältnisse, sondern zur Gewährleistung des Schleusenbetriebes und damit der erforderlichen Wasserpiegellagen in den Stauhaltungen.

2.12. Kraftwerksinteresse

Bei staugeregelten Flüssen, die mit Hilfe von Wasserkraftwerken der Stromerzeugung nutzbar gemacht worden sind, wäre eine ausgeglichene Wasserführung von der Größenordnung der Ausbauwassermengen der Kraftwerke wünschenswert. Abflüsse, die die Ausbauwassermengen überschreiten, können nicht genutzt werden, es sei denn, sie können weitgehend oberhalb der Kraftwerkskette gespeichert und zu Zeiten geringen natürlichen Abflusses eingesetzt und der Verbesserung der Energierzeugung dienstbar gemacht werden. Eine sinnvolle Speicherbewirtschaftung, auch in Verbindung mit Pumpspeicherbetrieb, kann zu einem Optimum der Energieerzeugung führen. Bei einem für die Schleusungen jederzeit ausreichenden Wasserdargebot ist jedoch ein gleichzeitiges Interesse der Schifffahrt an einer Verbesserung des Niedrigwasserabflusses nicht vorhanden.

2.13. Verbesserung der Wasserqualität

Der Gütezustand des Wassers von Flüssen, die Vorfluter dichtbesiedelter und hoch-industrialisierter Gebiete sind, bereitet den zuständigen Behörden wachsende Sorge; er ist u. a. unter den vielschichtigen Aspekten des Umweltschutzes zu beurteilen. Da sich Industrien, die einen großen Wasserbedarf sicherstellen müssen, bevorzugt an Wasser-

straßen mit ihrem relativ großen Wasserdargebot anzusiedeln pflegen, ist das Problem der Reinhaltung zwar nicht auf Wasserstraßen beschränkt, aber hier doch besonders vordringlich zu lösen. Dasselbe gilt für die Ballungsgebiete menschlicher Siedlungen, die zumeist mit Industriezentren gekoppelt sind. Viele Großstädte entwickelten sich auf Grund ihrer verkehrsgünstigen Lage an Wasserstraßen, die infolgedessen Gefahr laufen, sowohl durch häusliche als auch durch industrielle Abwässer verstärkt belastet zu werden. Wenn auch die Forderung gestellt werden muß, daß der Belastungsgrad eines Wasserlaufes der niedrigsten Wasserführung angepaßt werden sollte, so ist doch unter Berücksichtigung der Entwicklung nach dem 2. Weltkrieg die Frage berechtigt, inwieweit der Gütezustand eines durch Abwässer stark belasteten Flusses durch Niedrigwasseranreicherung verbessert werden kann. Auch die Schifffahrt kann aus dieser Sicht an einer Erhöhung des Niedrigwasserabflusses interessiert sein, wenn nämlich durch Abwassereinleitungen bedingte Schlammablagerungen die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs behindern.

2.14. Verhinderung unzulässiger Erwärmung durch Kühlwassereinleitungen

Das Einleiten des Kühlwassers von Wärmekraftwerken, die sich wegen ihres hohen Kühlwasserbedarfs bevorzugt an großen Wasserstraßen niederlassen, bewirkt eine Erwärmung des Flußwassers. Die Aufheizung des Flußwassers ist in Niedrigwasserzeiten besonders wirksam. Auf die dadurch bedingte negative Beeinflussung des Sauerstoffhaushaltes und ihre Folgen auf die Biologie des Flusses soll hier nicht eingegangen werden. Im Interesse der Schifffahrt muß jedoch die Gefahr einer verstärkten Nebelbildung durch Kühlwassereinleitungen und einer Begünstigung von Schlammablagerungen durch Erhöhung der Wassertemperatur möglichst gering gehalten werden. Auch ein Wasserverlust durch erhöhte Verdunstung kann bei in Niedrigwasserzeiten wasserarmen Flüssen eine Rolle spielen. Ebenso müssen die Beeinflussung der klimatischen Verhältnisse und die Gewährleistung der einwandfreien Aufbereitung von Trinkwasser berücksichtigt werden. Eine Verbesserung der Niedrigwasserführung könnte die aufgezeigten Gefahren ermäßigen.

2.15. Sicherstellung von Verbrauchs- und Gebrauchswasser

Ein erheblicher Teil des Wasserbedarfs für Industrie, Landwirtschaft und Gemeinden wird unmittelbar oder mittelbar aus Flüssen gedeckt. Der Wasserverbrauch ist in Trockenzeiten oft am größten, so daß die Gefahr besteht, daß in Niedrigwasserzeiten der Gesamtbedarf nicht gedeckt werden kann. Dies gilt besonders bei einem großen Anteil des Wasserbedarfs an Verbrauchswasser, das dem Fluß in Form von Abwasser nicht wieder zugeführt wird. Eine Niedrigwasseraufbesserung könnte Abhilfe schaffen. Auch kann die Landwirtschaft in Trockenzeiten an einer Anreicherung der Grundwasserstände durch Erhöhung der Wasserstände im Vorfluter interessiert sein.

2.16. Koordinierung verschiedener Interessen

Es muß festgestellt werden, daß eine Niedrigwasseraufbesserung günstigstenfalls gleichzeitig allen vorstehend geschilderten Interessen dienen kann; in diesem Fall würde ein Optimum an Wirtschaftlichkeit der zu treffenden Maßnahmen erreicht werden. Eine Nutzen-Kosten-Analyse würde die notwendigen Aufschlüsse geben; sie würde sicherlich am günstigsten ausfallen, wenn nur ein einziges Interesse geltend gemacht werden könnte, was nicht ausschließt, daß die Analyse auch dann zu einem positiven Ergebnis führt.

2.2. *Möglichkeiten der Verbesserung des Niedrigwasserabflusses*

2.21. Schaffung künstlicher Speicherbecken im Einzugsgebiet

Die Möglichkeit, einen Fluß im Interesse der Schifffahrt durch Regulierung oder Stauregelung auszubauen, soll hier außer Betracht bleiben, weil sie das Thema nicht berührt, das ausdrücklich von einer Verbesserung des Abflusses spricht. Es soll jedoch bei der weiteren Betrachtung das Schiffsfahrtsinteresse herausgestellt werden, da eine Abflußverbesserung für die Schifffahrt auch den anderen Interessen mehr oder weniger zwangsläufig zugute kommen kann.

Eine Mittelwasser- oder Niedrigwasserregulierung eines schiffbaren Flusses kann ergänzt werden durch Anlage von Speicherbecken an Nebenflüssen oder im Oberlauf des Flusses selbst, die in Hochwasserzeiten gefüllt werden und in Zeiten geringen Abflusses mit Abladebeschränkungen für die Schifffahrt Zuschußwasser abgeben, um der Schifffahrt größere Tauchtiefen zu ermöglichen. Die Größe des nutzbaren Speicherraumes ist eine Wirtschaftlichkeitsfrage im Zusammenhang mit dem erzielbaren Gesamteffekt einer besseren Ausnutzung der Schiffsgefäße, wobei auch die Wirkung der Speicher zur Hochwasserrückhaltung in die Rechnung einbezogen werden muß. Eine Wirtschaftlichkeit der Anlage von Speichern allein zum Zwecke der Niedrigwasseraufbesserung für die Schifffahrt dürfte kaum nachweisbar, allenfalls bei starker Verkehrsbelastung der Wasserstraße erreichbar sein. Die Baukosten der Speicher sind nicht nur eine Funktion des erforderlichen Speicherraumes, sondern auch der geographischen und morphologischen Gegebenheiten. Die Wirkung der Zuschußwasserabgabe hängt von der Länge des zu bezuschussenden Abschnittes des Wasserlaufes und von seiner Bettgestaltung ab.

2.22. Regulierung natürlicher Seen

Mit der Regulierung natürlicher Seen im Einzugsgebiet des zu verbessernden Wasserlaufes kann ein ähnlicher Effekt erzielt werden wie bei der Anlage künstlicher Speicherbecken, jedoch muß hierbei auf die verschiedensten Interessen und Belange der Seeanlieger, vielleicht auch auf eine Seenschifffahrt, Rücksicht genommen werden. Einerseits muß eine Seeregulierung die Gefahr der Überschwemmung der Seeufer bannen, andererseits ist eine Absenkung des Seewasserspiegels nicht unbegrenzt möglich. Der Spielraum zwischen den wünschenswerten höchsten und niedrigsten Seewasserständen ist im Vergleich zu künstlichen Becken zumeist sehr begrenzt, was nicht besagt, daß damit der nutzbare Speicherraum in jedem Falle begrenzt sein muß; bei genügend großer Oberfläche des Sees bedeuten nämlich wenige cm Wasserspiegeldifferenz ein erhebliches zu bewirtschaftendes Wasservolumen.

Die Bewirtschaftung einer bestimmten Wassermenge zwischen festgelegten oberen und unteren Grenzen ist am einfachsten und am besten kontrollierbar mittels eines Regulierbauwerkes am Seeausfluß zu erreichen. Dieses Bauwerk kann ein Wehr mit beweglichen Verschlüssen sein, dessen bauliche Gestaltung den Belangen des Natur- und Heimatschutzes weitgehend Rechnung tragen muß. Es ist anzunehmen, daß unter bestimmten Voraussetzungen die Anlage eines solchen Wehres allein zum Zwecke der Fahrwasserverbesserung bei Niedrigwasser in einem unterhalb anschließenden Flußlauf wirtschaftlich vertretbar sein kann.

2.23. Überleitung von Wasser aus anderen Einzugsgebieten

Künstliche Speicher und natürliche Seen können auch zur Wasserabgabe an Flüsse fremder Einzugsgebiete herangezogen werden. Eine solche Abgabe ergibt sich oft zwangsläufig beim Ausbau verzweigter Wasserkraftsysteme in Gebirgsregionen, wo erhöhter Nutzen durch Zuleitung von Wasser aus fremden Einzugsgebieten erzielt wird. Eine

solche Wasseranreicherung kommt oft den Unterliegern und auch der Schifffahrt zugute. Andererseits kann ein Entzug von Wasser aus dem Einzugsgebiet eines schiffbaren Gewässers oder auch aus dem Flusse selbst der Schifffahrt in Niedrigwasserzeiten hinderlich sein.

Die Sicherstellung ausreichender Wasserzufuhr im Zuge der Schiffbarmachung oder des Ausbaues eines Flusses für den Verkehr mit größeren Schiffsgefäßen beschäftigt die Ingenieure besonders im Falle von Flüssen mit extrem niedriger Wasserführung in Niedrigwasserzeiten. Stehen im eigenen Einzugsgebiet keine ausreichenden Speichermöglichkeiten zur Verfügung oder könnten hier Speicher nur mit unwirtschaftlichem Kostenaufwand gebaut werden, so kommt die Überleitung von Wasser aus benachbarten Einzugsgebieten in Betracht. Dies kann im Zusammenhang mit Schifffahrtskanälen geschehen, die zwei Flüsse verbinden, es kann aber auch auf nichtschiffbare Zubringerleitungen zurückgegriffen werden. Die Wirtschaftlichkeit solcher Leitungen allein im Schifffahrtsinteresse dürfte zumeist zweifelhaft sein. Die Überleitung von Wasser wirft zudem schwerwiegende wasserwirtschaftliche, rechtliche und gegebenenfalls staats- und völkerrechtliche Probleme auf.

2.24. Wasserabgabe aus staugeregelten Flußstrecken

Zur Niedrigwasserverbesserung von freifließenden Flußstrecken kann auch daran gedacht werden, durch geeignete Bewirtschaftung von gegebenenfalls vorhandenen Stauhaltungen im Oberlauf des Flusses oder in Nebenflüssen eine Anreicherung des Niedrigwasserabflusses zu erreichen. Diese Methode kann naturgemäß nur beschränkte Wirkung haben, da der Umfang der zu bewirtschaftenden Stauraumvolumen verhältnismäßig gering ist. Es wäre denkbar, daß in Zeiten ausreichenden Abflusses ein Überstau in allen Stauhaltungen gehalten wird, der in Zeiten geringen Abflusses im Rahmen des Möglichen, auch im Hinblick auf die Schifffahrt, in einen Unterstau verwandelt wird. Wenn auch dieses Verfahren als selbständige Methode unzureichend bleiben muß, so kann es doch in Verbindung mit Abgabe aus Speichern und Seen zur vollen Wirksamkeit dieser Abgabe beitragen.

2.25. Mehrzweckprojekte

Die geschilderten Möglichkeiten zur Verbesserung des Niedrigwasserabflusses können im allgemeinen erst dann als wirtschaftlich vertretbar angenommen werden, wenn sie nicht nur der Schifffahrt, sondern weitestgehend auch den in Abschnitt 1 beschriebenen Interessen dienen. Darüber hinaus gehen Maßnahmen zur Abflußverbesserung bei Niedrigwasser und zum Hochwasserschutz oft Hand in Hand. Auch künstlich geschaffene Retentionsräume in Flußtälern können durch geeignete Bewirtschaftung der Niedrigwasseraufbesserung nutzbar gemacht werden, indem die zurückgehaltenen Wassermengen nicht unmittelbar nach Abfluß des Hochwassers abgegeben, sondern bis zu Niedrigwasserzeiten zurückgehalten werden. Unter dem Zwange optimaler Bewirtschaftung des kostbaren Wasserschatzes werden die relativ hohen Investitionen für die in Frage kommenden Maßnahmen nur gerechtfertigt sein, wenn diese als Mehrzweckprojekte geplant und ausgeführt werden und somit weitesten Kreisen der Bevölkerung unmittelbar oder mittelbar dienen.

2.3. Beispiele

2.31. Weser

Zu Anfang des Jahrhunderts wurde die Kanalisierung der Weser als Voraussetzung für eine Wasserentnahme aus diesem Fluß zur Speisung des Mittellandkanals angesehen. Als jedoch beschlossen wurde, den Ausbau des Mittellandkanals auf den westlichen

Abschnitt bis Hannover zu beschränken, zog Bremen seine Zusage, die Kosten für die Kanalisierung der Weser zwischen Minden und Bremen zu übernehmen, zurück. So kam es zum Bau von Talsperren an der Eder und an der Diemel, die den Speisungswasserbedarf für den Mittellandkanal sicherstellen sollten; die Weserkanalisierung wurde zunächst zurückgestellt. Diese beiden Talsperren sollten daneben sowohl dem Hochwasserschutz als auch der Energieerzeugung dienen. Ferner sollte mit Hilfe des Zuschußwassers aus den Talsperren die Niedrigwasserstände der Weser verbessert und für die Schifffahrt bestimmte Mindestfahrwassertiefen geschaffen werden. Der Edersee mit seinem 202hm^3 nutzbaren Stauraum spielt auch heute noch für die Aufbesserung des Niedrigwassers der Weser bis Minden eine entscheidende Rolle, wenn auch die Wirkung der Bezuschussung nicht überschätzt werden darf, zumal der Schiffsverkehr auf der Oberweser relativ gering ist. Aber es ist doch wesentlich, feststellen zu können, daß die 1914 in Betrieb genommene Edertalsperre die älteste Talsperre in Deutschland ist, die der Beeinflussung der Wasserführung eines Flusses im Interesse der Schifffahrt dient.

Die Bezuschussung des Niedrigwasserabflusses der Weser aus dem Edersee wird auch heute noch mit Erfolg betrieben. Während bei einer Mittelwasserführung des Flusses von $106\text{ m}^3/\text{s}$ bei Hann.Münden und von $170\text{ m}^3/\text{s}$ bei Minden Fahrwassertiefen von 160 cm bzw. 200 cm möglich sind, kann in der Niedrigwasserperiode von April bis November die niedrigste Niedrigwasserführung 18 bzw. $34\text{ m}^3/\text{s}$ erreichen, die nur noch eine Fahrwassertiefe von 60 bis 70 cm gewährleistet. In dieser Zeit mußte oft wochenlang die Fracht- und Personenschifffahrt zwischen Kassel und Minden stillgelegt werden. Durch kurzfristiges Abgeben von Zuschußwasser ist es möglich, die Schifffahrt durch Wellenfahrten aufrechtzuerhalten. Die Zuschußmengen richten sich im Rahmen der gegebenen Möglichkeiten nach den Bedürfnissen der Schifffahrt und nach der Wasserführung des Flusses. Auf die Schilderung von Einzelheiten kann verzichtet werden, da eine genaue Beschreibung unter Abteilung I, Mitteilung 2 des Internationalen Schifffahrtskongresses 1961 gegeben worden ist [5].

Die Edertalsperre dient zwar vornehmlich, aber nicht ausschließlich der Schifffahrt; sie ist daher als Mehrzweckanlage anzusehen.

2.32. Neckar

Die Kanalisierung des Neckars konnte im Jahre 1968 mit der Inbetriebnahme des Abschnittes Stuttgart—Plochingen fertiggestellt werden. Während das Reichsverkehrsministerium im Jahre 1928 mit einem jährlichen Verkehrsaufkommen von 2,5 bis 3,0 Millionen Tonnen gerechnet hatte, erreichte der Güterverkehr nach Einweihung des Hafens Stuttgart im Jahre 1960 bereits 12 Millionen Tonnen. Im Jahre 1970 wurde der bisherige Höchstverkehr von fast 14 Millionen Tonnen erzielt. Die Frage, ob am Neckar überall und jederzeit das erforderliche Schleusungswasser bereitgestellt werden kann, scheint daher berechtigt zu sein. Während jedoch trotz des hohen Verkehrsaufkommens die Sicherstellung des Betriebswassers unterhalb der Enzmündung nicht in Frage steht, könnten oberhalb Engpässe entstehen, zumal zu berücksichtigen ist, daß bei Plochingen ein NNQ von $3,7\text{ m}^3/\text{s}$ gemessen wurde. Untersuchungen der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Stuttgart haben jedoch gezeigt, daß zwar die Stauhaltung Untertürkheim unterhalb des Stuttgarter Hafens den stärksten Wasserbedarf oberhalb der Enzmündung aufzuweisen hat, daß jedoch die sehr kurze Haltung Eblingen mit einer Länge von 850 m durch Wassermangel deswegen am stärksten gefährdet ist, weil oberhalb des Wehres Eblingen der Hammer-Kanal abzweigt, der Triebwerke mit insgesamt $14,5\text{ m}^3/\text{s}$ speisen muß. Der Wasserbedarf je Schleusung beträgt 7190 m^3 , der bei Verbundbetrieb auf 4314 m^3 ermäßigt werden kann. Während der täglichen Betriebszeit von 14 Stunden sind 20 Doppelschleusungen möglich, die bei Verbundbetrieb einen mittleren Abfluß von

1,71 m³/s bewirken. Der natürliche Zufluß von 3,7 m³/s bei NNW reicht demnach für Schleusungen zwar aus, jedoch werden während der 8,2 Minuten dauernden Schleusenfüllzeit der Haltung 8,8 m³/s entzogen, wobei unliebsame, für die Schifffahrt aber erträgliche Spiegelsenkungen entstehen. Unter den geschilderten Voraussetzungen ist hier ein Güterverkehr von rd. 3,6 Millionen Tonnen im Jahr zu bewältigen, ein Verkehr, der in absehbarer Zeit auf dem Abschnitt Stuttgart—Plochingen nicht erreicht werden wird. Ein Bedarf an Zuschußwasser besteht nur, wenn bei geringen Wasserführungen das Speisungswasser für die Triebwerke im Hammer-Kanal in der vor Aufnahme der Großschifffahrt gewährleisteten Menge sichergestellt werden muß. Die Wasser- und Schifffahrtsdirektion Stuttgart hat für den mittleren Abfluß der Jahresreihe 1921 bis 1965 die hierfür benötigten Zuschußwassermengen in Abhängigkeit vom Verkehrsaufkommen ermittelt. Sie betragen bei 2,0 Millionen Tonnen Güterverkehr 5,2 Millionen m³, bei 3,0 Millionen Tonnen 8,1 Millionen m³ für das mittlere Jahr. Der Bedarf in einem Trockenjahr, wie es das Jahr 1949 war, erhöht sich auf 9,6 bzw. 14,0 Millionen m³. Sollte der Verbundbetrieb an der Schleuse Eßlingen ausfallen, so würde der Bedarf um $\frac{2}{3}$ ansteigen.

Die ursprüngliche Planung, den bis Plochingen kanalisiertes Neckar mit der Donau durch einen Schifffahrtskanal zu verbinden, ist inzwischen aufgegeben worden. Mit Hilfe dieses Kanals hätte eine Bezuschussung des Neckars durch Donauwasser sichergestellt werden können. Pläne, im Einzugsgebiet des Neckars ein oder mehrere Speicherbecken zu bauen, wurden wohl untersucht, bisher aber nicht verwirklicht.

Die Frage des Zuschußwassers für den Neckar ist allerdings keineswegs nur unter dem Aspekt der Schifffahrt oder der Kraftnutzung zu sehen. Eine Bezuschussung würde nicht nur den erwähnten Triebwerken im Hammer-Kanal, sondern letztlich allen Neckarkraftwerken zugute kommen. Weit wesentlichere Gesichtspunkte ergeben sich aus Forderungen der Wasserwirtschaft und des Umweltschutzes. So werden als biologisch notwendige Mindestwasserführung des Flusses 20 bis 25 m³/s genannt.

Der Gütezustand des Neckars, der ein hochindustrialisiertes Gebiet mit hoher Bevölkerungsdichte durchfließt, ist so schlecht, daß er auch im Hinblick auf die Sicherstellung von Gebrauchs- und Verbrauchswasser, insbesondere von Kühlwasser einer Aufbesserung bedarf. Es liegt daher nahe, im Einzugsgebiet des Flusses Speicherbecken zu bauen. Untersuchungen [6] haben ergeben, daß es möglich wäre, oberhalb Plochingens 7 Speicher mit einem Volumen von 200 Millionen m³ zu bauen, die vornehmlich der Aufhöhung der Niedrigwasserabflüsse dienen könnten. Da sich die niedrigsten Niedrigwasser zu den höchsten Hochwasserabflüssen bei Plochingen wie 1 : 230 (Donau bei Ulm 1 : 25) verhalten und das Einzugsgebiet relativ klein ist, könnten diese Speicher dem Hochwasserschutz nur beschränkt nutzbar gemacht werden.

Neue Pläne für eine Verbesserung der Niedrigwasserabflüsse des Neckars sind im Zusammenhang mit den Planungen für eine Regulierung des Bodensees entwickelt worden. So besteht die Möglichkeit, mittels eines Stollens, der den Bodensee mit dem Neckar verbindet, maximal 20—25 m³/s dem Bodensee zu entnehmen, sofern die Anliegerstaaten des Sees dieser Entnahme zustimmen und die Entnahme mit den Zielsetzungen einer Bodenseeregulierung in Einklang gebracht werden kann. Zu diesen Zielsetzungen gehört nämlich auch die Möglichkeit einer Niedrigwasseranreicherung des Rheins für die Schifffahrt unterhalb des kanalisiertes Oberrheins. Es wird daher vor Abgabe von Bodensee-wasser an den Neckar zu prüfen sein, ob eine Überleitung von Wasser in ein fremdes Einzugsgebiet den Interessen der Bodensee-, Hochrhein- und Oberrheinanlieger sowie den Interessen der Benutzer der Wasserstraße Rhein entgegensteht.

2.33. Rhein

Im Rahmen der Planung für eine Bodenseeregulierung wird geprüft, ob und in welchem Umfange eine Abgabe von Zuschußwasser aus dem See bei Niedrigwasser des Rheins zwecks Erhöhung der Abladetiefe der Rheinschiffahrt auf Ober- und Mittelrhein möglich ist. Die Schiffahrt auf dem Rhein, der verkehrsreichsten Wasserstraße Europas, leidet bei Niedrigwasser im Frühjahr und insbesondere nach Beendigung der Schneeschmelze in den Mittelgebirgs- und Hochgebirgszonen im Herbst unter Abladebeschränkungen, die zur Bewältigung des Verkehrsaufkommens — im Jahre 1971 wurden auf dem Rhein rd. 180 Millionen Gütertonnen befördert — einen verstärkten Einsatz von Schiffsraum erforderlich machen und die Frachten durch die Erhebung von Kleinwasserzuschlägen erhöhen. Es zeigt sich, daß ein Bedürfnis zur Erhöhung der Niedrigwasserstände vor allem jeweils von September bis einschließlich Januar, d. h. während 5 Monaten besteht, wobei das Schwergewicht auf den Monaten Oktober und November liegt. Natürlich muß sich eine Wasserabgabe dem Gesamtreglement der Wasserbewirtschaftung des Bodensees einpassen, wobei die Hauptzielsetzungen einer Bodenseeregulierung zu berücksichtigen sind, nämlich

- a) Absenkung der hohen Seewasserstände unter die für den Ober- und den Untersee festgelegten Schadensgrenzen,
- b) Anhebung zu niedriger Seewasserstände im Sommer, wobei die Wasserstände bis etwa Ende September im Interesse des Fremdenverkehrs eine bestimmte Kote nicht nicht unterschreiten sollten,
- c) möglichst rasches Heben der Seewasserstände im Frühjahr,
- d) Verbesserung des Hochwasserschutzes am Oberrhein.

Neben der weiteren Zielsetzung einer Verbesserung der Fahrwassertiefen unterhalb der staugeregelten Strecke (z. Z. unterhalb Straßburgs, nach Fertigstellung des nächsten Ausbauabschnittes im Jahre 1977 unterhalb der Staustufe Iffezheim) in den genannten Monaten soll auch die Möglichkeit, zusätzlich Wasser aus dem Bodensee für wasserwirtschaftliche Zwecke, insbesondere für Trinkwasserzwecke, zu entnehmen, verbessert werden.

Es dürfte feststehen, daß die Zielsetzungen der Bodenseeregulierung am besten durch den Bau eines regulierbaren Wehres am Ausfluß des Rheins aus dem See oder kurz unterhalb des Ausflusses erreicht werden kann. Das Eidgenössische Amt für Wasserwirtschaft in Bern hat eine Firma mit der Ausarbeitung des Bauentwurfes für ein solches Wehr, das im Rhein bei Hemishofen zu bauen wäre, beauftragt. Ein internationaler Ausschuß, der sich mit der Bodenseeregulierung befaßt, hat dieses Projekt bereits einer Prüfung unterzogen und den Entwurf für ein Regulierreglement aufgestellt, der auch eine Wasserabgabe für Zwecke der Rheinschiffahrt berücksichtigt. In der untersuchten Jahresreihe 1941 bis 1965 wäre im Mittel von 21 Tagen in den Wintermonaten eine Abgabe von Zuschußwasser möglich gewesen, wodurch eine Vergrößerung der Fahrwassertiefe im Mittelrhein um 15 cm erreicht worden wäre. Insgesamt wäre es möglich gewesen, an 17 in den 25 untersuchten Jahren Zuschußwasser abzugeben. Zum 1. Oktober hätten im Mittel dieser Jahresreihe 163,8 Millionen m³ für eine Abgabe zur Verfügung gestellt werden können. Da es sich um einen Mittelwert handelt, ist zu berücksichtigen, daß in Trockenjahren bei niedrigen Seewasserständen unter Umständen keine oder nur geringe und damit unwirksame Zuschußwasserabgabe möglich ist. Im Jahre 1949 hätten dagegen 260,4, im Jahre 1964 252,7 Millionen m³ abgegeben werden können. Es ist einleuchtend, daß die Vergrößerung der Fahrwassertiefen im Rhein und die Dauer der Wasserabgabe von den verfügbaren Wassermengen im See abhängig ist. Aus Schiffahrtskreisen wurde der Wunsch vorgetragen, die Fahrwassertiefe wenigstens um 15 cm bei einer Dauer kon-

stanter Wasserabgabe aus dem See an mindestens 21 Tagen zu verbessern. Eine Erhöhung der Wassertiefe von 15 cm setzt eine Vergrößerung der Abflußmenge am Pegel Kaub um rd. 90 m³/s voraus. Ein 1350-t-Schiff vom Typ Johann Welker würde damit in die Lage versetzt, rd. 100 t zusätzlich laden zu können. Der Wunsch der Schifffahrt, wenigstens an 21 Tagen Zuschußwasser ohne Unterbrechung abzugeben, hätte für die Jahresreihe 1941 bis 1965 bei 15 Jahren erfüllt werden können, wobei 1949 bzw. 1964 sogar 33 bzw. 32 Tage erreicht worden wären. An zwei Jahren wäre eine Abgabe an 20 Tagen möglich gewesen, so daß doch an 17 von den untersuchten 25 Jahren der Rheinschifffahrt hätte wirksam geholfen werden können. Bemerkenswert ist, daß an 8 Jahren eine Zuschußwasserabgabe wegen ausreichender Rheinwasserstände entbehrlich gewesen wäre. Von diesen 8 Jahren sind jedoch 5 Jahre, an denen eine auskömmliche Zuschußwassermenge nicht zur Verfügung gestanden hätte.

Die Kriterien, die zur Auslösung und zur Wiedereinstellung der Wasserabgabe führen, müßten zu gegebener Zeit noch festgelegt werden, wobei sie mit den Hauptzielsetzungen der Bodenseeregulierung und den Bedingungen des Reglementes in Einklang zu bringen wären. Voraussetzung für ein wirksames Funktionieren der Wasserabgabe ist eine sichere Voraussage der Niedrigwasserstände im Oberrhein, die eine rechtzeitige Ankündigung der Wasserabgabe und damit ein entsprechendes Disponieren der Schifffahrt ermöglicht. Da die Fließzeit vom geplanten Wehr Hemishofen bis Kaub etwa 5 Tage beträgt, ist zu untersuchen, ob die Wirkung der Bezuschussung durch geeignete Bewirtschaftung der Stauräume im Ober- und Hochrhein nicht beschleunigt und erhöht werden könnte. Im übrigen würde eine Zuschußwasserabgabe auch den Kraftwerken am Hoch- und Oberrhein zugute kommen.

3. Maßnahmen zur Verringerung des Hochwasserabflusses

3.1. Zweck und Ziele einer Verringerung des Hochwasserabflusses

Der Ausbau einer Großschiffahrtsstraße und ihrer Nutzungen in Ufergebieten erhält sehr wesentliche Maße durch das „maßgebende Hochwasser“ des Ausbaues. Der Unterlauf eines Flusses besitzt meist von Natur aus langfristige Schiffbarkeit, somit lange Zeit schon intensive Nutzung in Ufergebieten, deren Schutz gegen die größten Hochwasser in der Vergangenheit erstellt wurde. Der Oberlauf hat von Natur aus weniger ausgeglichene Abflüsse, größere Gefälle, relativ kleinere Wassertiefen, oft noch stark wirksame Erosion oder Auflandung und ist nur beschränkt oder gar nicht schiffbar. Sein großes Gefälle gibt Anreiz zur Energiegewinnung mittels Stauregelung, sein ergänzender Ausbau zur Großschiffahrtsstraße wird dadurch realisierbar.

Eine Stauregelung bewirkt eine erhebliche Verkürzung der Laufzeiten der Hochwasserwellen als Folge der Verringerung von Retention, nämlich vertikal zwischen gestaut geringer werdenden Wasserstandssteigerungen und seitlich durch Abschalten von Überflutungsgebieten neben den Stauhaltungen.

Die raschere Welle des Oberlaufs sammelt die Wellen der Nebenflüsse zeitlich dichter zu erhöhter Welle, die ab unterster Stufe dem Unterlauf früher zufließt und auch dort sich den Nebenflüssen in höheren Bereichen der Wellen zu weiterer Steigerung zuaddieren kann.

3.11. Schifffahrtsinteresse

3.11.1. Wasserstraße

Die Schifffahrt auf dem frei fließenden Fluß ist zeitlich beschränkt, bei Niedrigwassermangels Wassertiefe, bei Hochwasser durch Einstellung ab Überschreitung eines höch-

sten Schiffahrtswasserstandes wegen nicht mehr ausreichender Antriebskraft, Orientierung und Navigation der Schiffe.

Die Schiffahrt auf dem mittels Stauregelung ausgebauten Oberlauf ist bei Niedrigwasser unbeschränkt und hat bei Hochwasser in einer übersichtlichen Wasserstraße und in einer durch Stau verringerten Strömung längere Zeit schiffbare Verhältnisse als der Unterlauf.

Bei sich ankündigendem Hochwasser sind Schiffe im Unterlauf mit Ziel im Oberlauf bestrebt, diesen und damit ihr Ziel zu erreichen.

Da ein Zeitgewinn vor Einstellung der Schiffahrt auf dem Unterlauf durch Verringerung des Hochwasser-Abflusses wegen des raschen, durch starken Niederschlag verursachten Anstiegs der Wasserstände zu gering ist, erhält eine Hochwasservorhersage für den Unterlauf erhöhte Bedeutung.

3.112. Nutzungen der Wasserstraße

Ein „maßgebendes Hochwasser“ bestimmt die Dimensionen für die Höhe der Schutzbauten und für die Anpassungen aller Anlagen am Fluß und, wo solche in voller notwendiger Höhe nicht möglich sind, für die Verringerung des Hochwasserabflusses im Bereich des Scheitels bis zu dem des „maßgebenden Hochwassers“.

Bei schon intensiver Nutzung im Ufergebiet des Unterlaufs wird bei Stauregelung des Oberlaufs die Erhöhung der Hochwasserwellen unterhalb der untersten Stufe meist durch entsprechende Retention oberhalb für den Unterlieger schadlos zu machen sein.

Ohne Schutz der Ufergebiete, welche die Anlagen für die Nutzung der Wasserstraße benötigen, verliert die Wasserstraße ihren Sinn.

3.12. Kraftwerksinteresse

3.121. Wasserkraftwerke

Die gegenseitige Beeinflussung von Hochwasser und Wasserkraftnutzung ist bei Flußkraftwerken und bei Pump- bzw. Hochspeicherkraftwerken unterschiedlich.

Die Erstellung von Flußkraftwerken hat Stauregelung zur Grundlage und Erhöhung der Hochwasser zur Folge. Zunächst ist die maximale Betriebswassermenge für die Größe des Ausbaues des Kraftwerks selbst wählbar, zwingend aber ist das „maßgebende Hochwasser“ für die Dimensionierung der Dämme der Stauhaltungen und der Wehre.

Die Wasserkraftwerke müssen an einem hohen effektiven Ausbau des Kraftwerks und niedrigem maßgebendem Hochwasser interessiert sein. Der Ausbau kann mittels Schwellbetrieb zur Erzeugung hochwertigen Spitzenstromes in Tageszeiten erhöhten Energiebedarfs wirtschaftlich optimal werden, besonders bei entsprechend großen Ausgleichsbecken oberhalb und unterhalb der Kette der Kraftwerke. Durch Einsatz der beiden Becken zur Retention von Hochwasser können die seltenen sehr großen Hochwässer eine Ermäßigung erfahren.

Pumpspeicher-Hochdruckwerke arbeiten im Verbund mit Flußstauhaltungen als Unterbecken und mit einem meist großen Oberbecken in nahem Gebirge, dessen Füllung zum größten Teil mit Wasser aus dem nicht genutzten Teil der Wasserführung des Flusses, somit auch bei Hochwasser erfolgt. Ein erheblicher Teil des bei Hochwasser aus dem Fluß abgepumpten Wassers ist auch bei Spitzenstromerzeugung zugleich Hochwasser-Retention zusätzlich zum natürlichen Hochwasser-Zufluß zum Speicher.

Pumpspeicher und Speicher mit natürlichem Einzug sind auch aus Gründen der Verringerung des Hochwasser-Abflusses der öffentlichen Förderung würdig.

3.122. Thermische Kraftwerke

Bei einer Aufwärmung um 10°C ist eine Kühlwassermenge von etwa $4\text{ m}^3/\text{s}$ für 100 MW erforderlich. Bei den zukünftigen großen Einheiten der Atomkraftwerke stellt die Abwärme, die mittels dem Fluß entnommenem Kühlwassers aus den Kondensatoren der Dampfmaschinen herausgezogen wird, Probleme der Ableitung in die Umwelt. Diese ergeben sich aus Größe, jahreszeitlicher Schwankung der Wasserführung des Flusses einerseits, Zahl, Größe und Dichte der Stationierung der Atomkraftwerke andererseits. Dabei ist die zulässige Aufwärmung des Flusses begrenzt.

Die Deckung der Tagesmaxima des Energiebedarfs durch Pumpspeicherwerke ist eine notwendige Ergänzung der Atomkraftwerke. Standorte für Unterbecken im Fluß und große Oberbecken im nahen Gebirge bieten sich für Atomkraftwerke an, die ihr Kühlwasser laufend in Hochspeicher mit großer Wasseroberfläche in kühler und windigerer Höhenlage pumpen und es abgekühlt in den verschiedenen Tageszeiten erhöhten Energiebedarfs auf diese kürzeren Zeiten konzentriert zurückfließen lassen können. Dabei würde ein unteres Auffangbecken für etwa ein Fünftel der Tagesmenge des Kühlwassers erlauben, das gesamte Kühlwasser hochzupumpen.

Die Dimensionierung der Druckleitung (Stollen) auf ein Betriebswasser, dessen Menge doppelt so groß ist, als während mehr als der doppelten Zeit aufwärts zu pumpen nötig wäre, würde eine etwa doppelte Förderung von Pumpwasser möglich machen. Etwa die Hälfte davon würde bei größerer Wasserführung eine langfristige Speicherung und bei Hochwasser eine Verringerung des Hochwasserabflusses darstellen.

Die Anlage von Hochspeichern auch dieser Zweckbestimmung ist wegen der dabei entstehenden Verringerung von Hochwasserabfluß gleicherweise wie die unter 3.121. geschilderte der öffentlichen Förderung würdig.

3.13. Wasserqualität

Sowohl die Speicherung des Flußwassers in natürlichen oder künstlichen Seen, also in stehenden Gewässern, als auch die Aufwärmung des Flusses verlangen gute Wasserqualität, wenn nicht für die Trink- und Brauchwasserversorgung, für die Rekreation am und auf dem Fluß, für die Siedlungsgebiete am Fluß und für die Flußlandschaft große Verluste entstehen sollen.

Die Stauregelung verändert das Verhalten der Inhaltsstoffe des Wassers. Schwebstoffe werden in stilleren Zonen abgesetzt. Beim Anstieg zu Hochwasser werden letztere zur gleichen Zeit mit den Abwaschungen des Niederschlags aus Verkehrsflächen, Kanälen und ungereinigten Abwässern aus Regenentlastungen ausgespült. Im oberen Bereich großer Hochwasserwellen sind diese Stoffe bereits abgegangen. Die Retention in seitlichen Überflutungsgebieten lagert deshalb weder unnatürliche oder schädliche Stoffe ab, noch macht ihr versickernder Teil durch zehrende oder schädliche Stoffe das Grundwasser unbrauchbar.

3.14. Verbrauchs- sowie Gebrauchswasser

In einem weit entwickelten Gebiet ist auch am Oberlauf über den leicht nutzbaren Teil der Wasserführung bis über Mittelwasser bereits verfügt. Die Beschränkung der Füllung auf die kurzen Zeiten großer Wasserführung und die großen laufenden Mengen für die Versorgung großer ferner Mangelgebiete macht die Füllmengen solcher Speicher besonders bei Hochwasser groß.

3.2. Möglichkeiten von Maßnahmen zur Verringerung des Hochwasserabflusses

Hinweise auf den Rhein als Beispiel.

3.21. Natürliche Seen

Hinter Endmoränen der Gletscher und Felsstürzen im Lauf des Flusses entstanden, verringern Seen die zufließende Hochwasserwelle zu Beginn ihres Anstiegs auf den zuvor vorhandenen Abfluß aus dem See, der sich mit Steigerung der Seestände durch Retention um so geringer erhöht, je größer die Seefläche ist. Die Retention im See läuft nach Ablauf des Hochwassers im Fluß nach.

Der Rhein hätte ohne Seeretention bei Basel statt eines alle 1000 Jahre zu erwartenden Hochwassers von $6000 \text{ m}^3/\text{s}$ ein solches von rd. $10\,000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Aufladungen oberhalb der Seen können dem Fluß den Weg zu seinem See verschüttet haben. Die Wiederherstellung des ursprünglichen natürlichen Durchflusses durch den See ist eine sehr wirksame Verringerung des Hochwasserabflusses. Im Rheingebiet wurden die Einleitungen der Aare in den Bieler See und der Linth in den Walensee wiederhergestellt.

3.22. Regulierte Seen

Mittels eines Regulierwehres am Auslauf eines Sees können dessen Abflüsse und Seestände (Retention) verändert werden in den Grenzen der Zulässigkeit, die gegeben sind durch die Nutzungen der Ufergebiete des Sees und des Flusses. Im Falle der Regelmäßigkeit jahreszeitlichen Anstiegs zum höchsten Seestand kann ein vom Seestand abhängig gemachter Vorabfluß durch langfristig sich summierende mäßige Vergrößerung des Abflusses die Seestände niedriger halten, den See für Hochwasser schadlos aufnahmefähiger machen. Mit dem Regulierwehr läßt sich durch Austiefung des Seeauslaufes der Bereich der Seestände nach unten erweitern, wenn dies nach oben wegen der Uferbebauung nicht möglich ist. Dadurch wird das bewirtschaftbare Volumen gesteigert und die Aufnahmefähigkeit für Hochwasser gleichfalls verbessert.

Bei seltenem, gefährlichem, sehr großem Hochwasser des Flusses kann der vorhandene Abfluß aus dem See gedrosselt werden, entweder ganz oder bis zu einem minimalen Abfluß, der abhängig ist von Nutzungen bis zum nächsten größeren Zufluß und von der Schädlichkeit der Vergrößerung des Seeanstieges.

Im Rheingebiet sind hierfür Beispiele die regulierten Schweizer Seen und die geplante Regulierung des Bodensees. Im Winter, wenn im Rhein durch Schneeschmelze im Mittelgebirge die größten Hochwasser entstehen, erscheint eine Verringerung der Abflüsse bei dann niedrigen Seeständen immer möglich.

In der Summe der Seen kann diese Retention ein erheblicher Beitrag zur Verringerung der Hochwasserabflüsse des Rheins werden.

3.23. Künstliche Seen

Sie werden zur Gewinnung von Energie, Trink- und Brauchwasser, Zuschußwasser zur Verbesserung des Niedrigwasserabflusses mit deren im vorangegangenen Kapitel behandelten zahlreichen Zielen meist im Gebirge, aber auch als Ausgleichsbecken im oder neben dem Fluß angelegt. Im Gebirge sammeln sie den dort überdurchschnittlichen Niederschlag, Abgang des jahreszeitlichen Vorrats an Schnee und im Hochgebirge den der Gletscher aus früheren Klimaperioden.

Bei erheblich geringerem laufendem Abfluß aus den Seen speichern sie den Hochwasserzufluß und verlegen ihn in spätere Zeiten des Bedarfs. Bei großer Summe ihrer Einzugsflächen und Niederschläge erbringen sie entsprechend große Verringerung des Hochwasserabflusses in den Flußstrecken abwärts.

Künstliche Seen werden zunehmend mit hochgepumptem Wasser aus noch nicht genutzter höherer Wasserführung eines Flusses gefüllt, darunter Hochwasser. Hierzu ist unter 3.121. und 3.122. skizziert.

Im Rheingebiet ist die Verringerung des Hochwasserabflusses der alpinen Hochspeicher beschränkt auf die Flußstrecken bis zu den großen Seen am Rand der Alpen, wo sie schon von Natur aus große Verringerung erfuhren oder von einem Reglement des Sees erfaßt werden, das weiter ausgleichend wirkt.

Für die weitere Zukunft kann vermutet werden, daß auch Pumpspeicherungen in künstlichen Seen eine zunehmende Entlastung bei Hochwasser bringen können.

3.24. Flußstrecken mit Stauregelung (Oberlauf)

3.241. Laufzeit der Hochwasser-Wellen

Die Laufzeit bestimmt die Addition der Wellen der Nebenflüsse. Unter 3.1. ist auf die Verkürzung der Laufzeiten im Fluß als Folge der Stauregelung hingewiesen.

In der Flußstrecke mit Stauregelung ist sie in den Grenzen zweier Betriebsarten der Stauhaltung steuerbar zwischen Betrieb unter Erhaltung des Wasserstands am Wehr (Stauziel) mit Veränderung des Inhalts der Stauhaltung und mit Laufzeit (Stauzielbetrieb) und

Betrieb unter Erhaltung des Inhalts der Stauhaltung durch Veränderung des Wasserstands am Wehr und ohne Laufzeit (Kippbetrieb).

Auf diese Betriebsarten und ihre Bedeutung bei der Koordinierung von verschiedenen, im Lauf weit auseinander liegender Maßnahmen zur Verringerung des Hochwasserabflusses wird unter 3.3. eingegangen. Entscheidend für die Betriebsart ist, ob die Zeit einer genauen Vorhersage vom Ort einer Maßnahme bis zur untersten Stufe ausreichend länger ist, als die Laufzeit für diese Strecke.

3.242. Seitenkanal-Teilstrecken

Bei Stauregelung mit längeren Seitenkanal-Teilstrecken neben Flußstrecken und großem Anteil des Betriebswassers am Hochwasserabfluß kann das Betriebswasser an den Kraftwerken gestoppt werden und die Strecke der Länge des Kanals, nunmehr aber ab Wehr im Flußbett wiederholt durchfließen. Für das Betriebswasser entspricht dies einer Verlängerung des Flußlaufes um die Länge der Flußstrecken neben den Kanalstrecken und der Laufzeiten um die dazu benötigten zusätzlichen Laufzeiten.

Diese lassen sich anhand der Näherungsformel für die Laufgeschwindigkeit (c) im stationären Abfluß ermessen:

$$c = \frac{\Delta Q}{\Delta z \cdot b}; \text{ darin ist}$$

ΔQ die Änderung des Abflusses,

Δz die zugehörige Änderung des Wasserstandes,

b die Breite des Wasserspiegels des Querschnittes.

Je kleiner c, je länger ist die Laufzeit $T = \frac{s}{c}$ durch die Flußstrecke s.

Die Retention ist

$$\Delta Q \cdot T = \Delta z \cdot b \cdot c \cdot T = \Delta z \cdot b \cdot s$$

Je größer die durchflossene Breite des Flußbettes b bei Hochwasser ist, desto größer ist die Retention und dadurch die Laufzeit.

Neben Seitenkanälen verlaufende Flußstrecken mit Ausuferung in seitlichem Hochwasserbett ist eine Vergrößerung des Anstiegs des Wasserstandes Δz im Verhältnis zur Zunahme des Abflusses ΔQ möglich, wenn durch Querdämme der ganze Abfluß stellenweise in das Mittelwasserbett gedrängt wird (Wirkung von Buhnen).

Zugleich entsteht dort durch Querströmung eine zusätzliche Erhöhung der Wasserspiegel durch Einengen des effektiven Abflußquerschnittes des Mittelwasserbettes und durch Stauhöhe zur Beschleunigung in die Flußrichtung.

Stautellen in Flußstrecken mit Ausuferung neben Seitenkanälen können im Zusammenhang mit nur niedrigen überströmbaren Uferdämmen mit der Wirkung von Streichwerken so hoch angelegt werden, daß eine Überflutung des Hochwasserbettes und damit die Vergrößerung von b erst dann und unter Nutzung des ganzen anfangs noch leeren Retentionsraumes eintritt, wenn diese Retention zeitgerecht mithilft, die zulässige maximale Leistungsfähigkeit der Hochwasser-Schutzbauten unterhalb nicht zu überschreiten. Überströmbare Uferdämme sind in ihrer Gefällshöhe vom Fluß zum Retentionsraum des Hochwasserbettes beschränkt. Dessen Füllung und Entleerung ist abhängig vom Gang (Höhe und Dauer) der Welle des Hochwasserabflusses und kann somit nur gesteuert werden über diese Welle.

Dies kann nur geschehen in willkürlich steuerbaren großen Retentionsräumen oberhalb, deren Zu- und Abflußbauwerke große Leistung haben. Dies ist der Fall, wenn ein solcher Raum zwischen zwei Wehren als seeartige Erweiterung des Flusses möglich ist, weil die Wehre als Zu- und Abflußbauwerke die Leistung des „maßgebenden Hochwassers“ haben, auch werden besondere Bauwerke hierfür erspart.

Dagegen sind besondere Bauwerke großer Leistung für Füllung und Entleerung nötig bei seitlich, vom Fluß durch Dämme getrennten Poldern, deren Volumen bei waagrechttem Wasserspiegel, aber mit zunehmender Geländeneigung abnimmt und so am Oberlauf teuer wird.

Im Rhein sind Seitenkanal-Strecken neben Flußstrecken vorhanden, oberhalb Basel zwei, unterhalb Basel fünf. Zum Teil sind sie mit Staueinrichtungen zur Stützung des Grundwassers gegen Auslaufen in den Rhein versehen. Querdämme sind an einem Teil dieser Stautellen geplant.

3.243. Vorabfluß

Er ist im Anstieg einer Hochwasserwelle durch Absenken der Stauhaltungen möglich, addiert sich von Stauhaltung zu Stauhaltung abwärts und kann Anwendung finden, wenn die Addition der Nebenflußwellen unterhalb noch keine Überschreitung der maximalen Leistung der Schutzbauten hervorruft.

Der durch Vorabfluß freigemachte Raum gibt dem weiteren Anstieg der Welle eine tiefere Basis und damit eine größere Retention zur Verringerung der Abflüsse im Scheitelsbereich.

Die Anwendung hat eine genaue Vorausbestimmung aller sich addierender Wellen unterhalb zur Voraussetzung und hat bei Fehleinsatz schädliche, überhöhende Wirkung im Gegensatz zur Retention, die nicht schaden, nur etwa unnötig ermäßigend sein kann.

Ein Vorabfluß entsteht durch Stauabsenkung in Stadtgebieten zu deren besonderem Schutz. Am Rhein sind dazu Beispiele die Stadt- und Hafengebiete von Basel und Straßburg/Kehl.

3.244. Schwellbetrieb mit Ober- und Unterbecken (s. 3.121.)

Diese Becken lassen sich von einer gewissen Größe ab und in Abhängigkeit von der Schwellwassermenge auch für die Retention bei Hochwasser nutzen. Ihre Bereitschaft dazu

muß vor dem Hochwasser durch Entleerung hergestellt werden können. In langer Staukette läßt sich dies unter Umständen auch für eine längere Gefahrenzeit, z. B. die Zeit zu erwartender Schneeschmelze, bewirken, wenn das Oberbecken neben den zwei obersten Stauhaltungen liegt und bis zum Stauspiegel der zweiten Stauhaltung abgesenkt werden kann. Dadurch wird lediglich das oberste Kraftwerk vom Schwellbetrieb ausgenommen. Es entsteht dabei ein Retentionsraum mit großer Füllhöhe, der Gefällshöhe einer Kraftwerksstufe.

Um den Folgen der Erhöhung des Hochwasserabflusses durch Stauregelung zu begegnen, werden zunächst alle ihre nutzbringenden Anlagen und Möglichkeiten des Betriebs darauf zu prüfen sein, ob sie der Verringerung des Hochwasserabflusses bei den seltenen sehr großen Hochwässern dienstbar gemacht werden können. Danach werden noch besondere ergänzende Maßnahmen unerläßlich.

3.3. *Die Koordinierung verschiedener Maßnahmen durch den Betrieb der Stauregelung am Oberlauf bei sehr großem Hochwasser*

3.31. Notwendigkeit der Koordinierung

Sobald an einem Strom eine Verbesserung des Hochwasserschutzes oder die Erhaltung des bisherigen Schutzes bei einer Erhöhung der Hochwassergefahr nicht durch Erhöhung der Hochwasserdämme allein möglich ist, so daß zusätzlich Maßnahmen zur Hochwasserrückhaltung getroffen werden müssen, wird neben den Baumaßnahmen eine betriebliche Regelung erforderlich. Diese betriebliche Regelung gewinnt um so mehr an Bedeutung, je größer das zurückzuhaltende Wasservolumen ist und je mehr verschiedene Maßnahmen zur Rückhaltung eingesetzt werden müssen.

Am Oberrhein ist als Folge verschiedener technischer Eingriffe, zuletzt der Stauregelung unterhalb von Basel, eine Verschärfung der Hochwassergefahr für die Unterlieger eingetreten. Sie kann durch Erhöhung der bestehenden Hochwasserdämme in der Rheinestrecke unterhalb der letzten Staustufe, wenn überhaupt, so nur in sehr bescheidenem Maße bekämpft werden. Die erhöhten Hochwasserwellen sehr großer Hochwasser müssen daher weitestgehend durch Hochwasserrückhaltung auf das in dieser Strecke zulässige Maß reduziert werden.

Ein einziger Retentionsraum, der die gesamte zu speichernde Abflußfülle aufnehmen könnte, ist nicht möglich. Es müssen vielmehr die verschiedenen, unter 3.2. für den Rhein geschilderten Schutzmaßnahmen weitgehend herangezogen werden, wenn ein den heutigen Bedürfnissen entsprechender Hochwasserschutz erreicht werden soll.

3.32. Möglichkeiten der Koordinierung

Unter Koordinierung verschiedener Hochwasserschutzmaßnahmen soll hier das Betriebsschema zum optimalen Einsatz verschiedener Retentionsmaßnahmen verstanden werden. Auf die technischen Einzelheiten der Steuerung des Betriebes — von Datenübermittlung über Rechenanlagen zur Bedienung der Wehre usw. — kann hier nicht näher eingegangen werden. Es sollen nur die Grundtypen der Koordinierung gezeigt werden, die sich in einem zur Staukette ausgebauten Strom anbieten.

3.321. Koordinierung ohne Beeinflussung der Laufzeit der Hochwasserwelle — Stauzielbetrieb —

Kann die Hochwasserrückhaltung mittels eines oder mehrerer unweit oberhalb der zu schützenden Strecke gelegenen Retentionsräumen erreicht werden, so ist eine Koordinie-

rung ohne Schwierigkeiten möglich. Dasselbe gilt, wenn zwischen Retentionsräumen und zu schützender Strecke ein längerer Abschnitt des Stromes liegt, in diesem Abschnitt aber keine Nebenflüsse münden, die den Hochwasserablauf nennenswert beeinflussen. Wird der Ablauf der Hochwasser jedoch durch die Hochwasserwellen von Nebenflüssen zwischen Retentionsraum und zu schützender Strecke gestört, so ist zum zeitgerechten Einsatz des Retentionsraumes eine Abflußvorhersage, die auch in beiden ersten Fällen von Vorteil ist, zwingend notwendig. Die Vorhersagezeit muß für jeden Nebenfluß mindestens so lang sein wie die Laufzeit der Hochwasserwelle des Stromes zwischen dem Retentionsraum und der Nebenflußmündung. Ist eine so lange Vorhersagezeit nicht möglich, so kann ein Retentionsraum nur dann mit Sicherheit voll eingesetzt werden, wenn sein Inhalt im Verhältnis zum gesamten erforderlichen Retentionsraum relativ klein ist und wenn die Gesamtzeit, in der Hochwasser zurückgehalten werden muß, beträchtlich größer ist als die o. g. Laufzeit.

Am Rhein muß ein großer Teil des erforderlichen Retentionsvolumens 100 km und weiter oberhalb der untersten Stufe zurückgehalten werden, und im unteren Teil dieser Strecke münden mehrere Nebenflüsse, die den Ablauf der Rheinhochwasser stark beeinflussen können. Eine Abflußvorhersage für diese Nebenflüsse ist aufgrund von Pegelbeziehungen nur für 2 bis 4 Stunden möglich, während die Laufzeit der Hochwasserwelle von den großen, nur am Oberlauf möglichen Retentionsräumen bis in den Bereich dieser Nebenflüsse ein Vielfaches dieser Zeit beträgt. Wie weit die Vorhersagefrist durch Einbeziehung der Niederschläge verlängert werden kann, soll untersucht werden, da jede Verbesserung der Abflußvorhersage einen Vorteil für die Steuerung der Schutzmaßnahmen bedeutet. Diese Untersuchungen dürften jedoch Jahre in Anspruch nehmen, und ob die erforderliche Vorhersagezeiten mit für die Hochwassersteuerung ausreichender Genauigkeit erreicht werden kann, bleibt sehr zweifelhaft. Eine Vorhersagezeit, die den zeitgerechten Einsatz des Bodensees oder der anderen Alpenrandseen für die Hochwasserrückhaltung ermöglichen würde, ist zudem schlechthin unmöglich. Man muß daher davon ausgehen, daß am Rhein eine Koordinierung der Hochwasserschutzmaßnahmen ohne Beeinflussung der Laufzeit der Hochwasserwelle nicht möglich ist.

3.322. Koordinierung mit Beeinflussung der Laufzeit

— Kippbetrieb —

Wie unter 3.241. angedeutet, lassen sich in einem zur ununterbrochenen Staukette ausgebauten Strom bei „Kippbetrieb“ Abflußänderungen am oberen und am unteren Ende gleichzeitig durchführen. „Kippbetrieb“ ist als Betriebsweise für Durchlaufspeicherung von Kraftwerksketten bekannt. Hier soll der Ausdruck im gleichen Sinne gebraucht werden, nur daß nicht ein Niederwasserabfluß durch die Kraftwerkskette moduliert werden soll, sondern der Abfluß sehr großer Hochwasser, wobei natürlich vor allem die Wehre bedient werden müssen. Hauptzweck der zeitlosen Durchgabe ist es, die Hochwasserabflußvorhersage als einschränkende Bedingung für den zeitgerechten Einsatz von Retentionsräumen zu eliminieren.

Als „reiner Kippbetrieb“ soll eine Betriebsweise bezeichnet werden, bei welcher der Inhalt jeder Staustufe vom Beginn der Umstellung an konstant gehalten wird. Aus der Kontinuitätsbedingung ergibt sich, daß dabei der momentane Abfluß Q_i aus jeder Stauhaltung i gleich ihrem momentanen Zufluß sein muß, der sich aus dem Abfluß Q_{i-1} aus der nächst oberen Stauhaltung und dem Abfluß Q_n der einmündenden Nebenflüsse zusammensetzt:

$$Q_i = Q_{i-1} + Q_n \quad (1)$$

Bezeichnet man die oberste Stauhaltung mit o und die unterste mit u , so ergibt sich für die ganze Staukette:

$$Q_u = Q_o + \sum_o^u Q_n \quad (2)$$

Der Anteil des Abflusses Q_u , der den höchsten unterhalb der letzten Staustufe zulässigen Abfluß \bar{Q}_u überschreitet, muß den oberhalb gelegenen Retentionsräumen als Zufluß $\sum Q_R$ zugeführt werden; mit

$$\bar{Q}_u - Q_u = \sum_o^u Q_R \quad (3)$$

erhält man

$$\bar{Q}_u = Q_o + \sum_o^u Q_n - \sum_o^u Q_R \quad (4)$$

bzw.

$$Q_o = \bar{Q}_u + \sum_o^u Q_n + \sum_o^u Q_R \quad (4')$$

Für jede beliebige Staustufe gilt entsprechend:

$$Q_i = \bar{Q}_u - \sum_i^u Q_n + \sum_i^u Q_R \quad (5)$$

Das bedeutet, daß bei Durchführung des reinen Kippbetriebes ein für die unterste Staustufe höchster zulässiger Abfluß \bar{Q}_u künstlich erzwungen werden kann, wenn ausreichender Retentionsraum zur Verfügung steht. Die Lage des Retentionsraumes in der Staukette ist dabei gleichgültig. Es muß nur der Abfluß aus jeder Stauhaltung so eingestellt werden, daß er, zusammen mit dem momentanen Abfluß der unterhalb mündenden Nebenflüsse und vermindert um die momentanen Zuflüsse zu den unterhalb gelegenen Retentionsräumen gerade diesen höchsten zulässigen Abfluß Q_u ergibt.

3.33. Probleme bei der Einführung des Kippbetriebes und ihre Lösungsmöglichkeiten

Es wird vorausgesetzt, daß die Umstellung der Staukette vom normalen Stauzielbetrieb auf den beschriebenen Kippbetrieb unter Berücksichtigung der für die Umstellung erforderlichen Zeitspanne erst dann erfolgt, wenn unterhalb der untersten Staustufe der höchste zulässige Abfluß erreicht wird. Weil aber zuvor die Hochwasserwelle die Staukette mit der dem Stauzielbetrieb entsprechenden Laufzeit (s. 3.4.2.1 ff) durchläuft, ist der Abfluß in den oberhalb gelegenen Stauhaltungen dann bereits größer, als beim reinen Kippbetrieb zulässig. Die Umstellung auf den Kippbetrieb ist also mit einer Abflußverminderung verbunden, wobei die Abflußdifferenz in der Regel stromaufwärts zunimmt. Im weiteren Verlauf des Kippbetriebes müssen die Abflüsse der oberen Stauhaltungen entsprechend dem Anstieg der Hochwasserwellen der Nebenflüsse (s. Gleichung 5) weiter verringert werden, bis deren Summe ihren Scheitel überschritten hat. Das kann zu gewissen Schwierigkeiten für die Durchführung des reinen Kippbetriebes führen.

3.331. Schwallerscheinungen bei der Umstellung auf Kippbetrieb

Durch die Abflußverminderung, die beim Beginn der Umstellung in relativ kurzer Zeit durchgeführt werden muß, können Schwallerscheinungen an den Wehren auftreten; je

nach den Abmessungen der Stauhaltung (Wehre, Dammhöhen usw.) könnten sie gefährlich werden. Dies kann durch entsprechende Vorbereitung der Umstellung, z. B. durch Wahl einer ausreichend langen Zeitspanne für die Abflußänderung, vermieden werden.

Am Rhein sind nach ersten Untersuchungen, die sich auf Erfahrungen von Versuchen für Durchlaufspeicherung mit Kippbetrieb stützen, die Schwallerscheinungen nicht so stark, daß sie der Einführung des Kippbetriebes bei Hochwasser im Wege stehen.

3.332. Erhaltung des konstanten Inhalts der Staustufen beim Kippbetrieb

Der Inhalt der Stauhaltungen muß vom Beginn der Umstellung an konstant gehalten werden. Er entspricht jeweils dem Abfluß am Ende des Stauzielbetriebes und ist damit zu Beginn des Kippbetriebes zwangsläufig zu groß; der Wasserspiegel in der Haltung kippt, am Wehr wird das Stauziel überschritten, und an der Stauwurzel sinkt der Wasserstand ab, bis das Gefälle dem neuen Abflußzustand entspricht. Im weiteren Verlauf wird der Abfluß noch mehr verringert, bis die Abflußsumme der Nebenflüsse unterhalb ihren Scheitel überschritten hat, es sei denn ein unterhalb gelegener Retentionsraum wird eingesetzt (s. Gleichung 5). Je nach den Abmessungen der Stauhaltung (Länge, Stauhöhe am Wehr usw.) führt dies dazu, daß im unteren Bereich die Dämme nicht mehr ausreichen. Diese Gefahr ist vor allem dann gegeben, wenn oberhalb einer Stauhaltung eine Strecke mit freiem Abfluß liegt. In diesen Strecken kann die Laufzeit nicht künstlich beeinflusst werden. Solange dort ein größerer Abfluß in Bewegung ist, als der reine Kippbetrieb für die Stauhaltung momentan vorschreibt, wird dieser in die Stauhaltung eintreten und deren Inhalt vergrößern. Dies gilt nicht nur für eine Ausbaulücke in der Staukette, sondern auch dort, wo das Flußbett neben Seitenkanälen zur Hochwasserabführung dient.

Wenn die Dämme für diesen Anstieg des Wasserstandes im unteren Teil der Stauhaltung nicht ausreichen, muß eine Entlastung in unterhalb gelegene Retentionsräume erfolgen. Sobald die oberhalb gelegenen Retentionsräume gefüllt sind und damit der Abfluß durch die Staukette zunimmt, wird deren Inhalt wieder entsprechend vergrößert, so daß dieses Volumen nicht etwa die Retentionsräume unnötig belastet. Das setzt voraus, daß möglichst nahe dem unteren Ende der Stauhaltung ein größerer Retentionsraum zur Verfügung steht, der durch entsprechende Steuerung bis zuletzt noch aufnahmefähig gehalten werden kann. Alle hier angedeuteten Steuerungsmaßnahmen bedeuten allerdings eine Abwendung vom Prinzip des reinen Kippbetriebes.

Bei Strecken mit freiem Abfluß ist von Fall zu Fall zu prüfen, ob nicht ihr Ausbau zu einem Retentionsraum durch Errichtung eines Wehres am unteren Ende und entsprechende Dammerhöhungen wirtschaftlich vertretbar ist. Damit wäre die Lücke in der Staukette geschlossen.

Am Rhein wird ein reiner Kippbetrieb voraussichtlich nicht möglich sein, weil er bei einigen Stauhaltungen zu einer zu großen Erhöhung der Wasserstände oberhalb des Wehres und in den Seitenkanalstrecken führen dürfte. Das Problem läßt sich jedoch dadurch lösen, daß außer den großen Retentionsräumen im Oberlauf noch einige kleinere längs der Staukette eingerichtet werden können. Die Errichtung eines größeren Retentionsraumes am unteren Ende der Staukette wird angestrebt.

3.34. Weitere Voraussetzungen für die Koordinierung verschiedener Maßnahmen durch Kippbetrieb

Im vorigen Abschnitt wurden die Probleme behandelt, die sich aus der Natur der Staukette und der Anordnungsmöglichkeit der Retentionsräume ergeben.

Daß für die Durchführung des Kippbetriebes ein zuverlässig arbeitendes mathematisches Modell des Stromes erforderlich ist, das neben der Staukette auch alle Retentionsmöglichkeiten enthält, versteht sich von selbst. Mit Hilfe dieses Modells muß der Hochwasserablauf aufgrund der eingehenden Wasserstands-, Abfluß- und u. U. meteorologischen Daten dauernd simuliert werden. Die Ergebnisse dieser Rechnungen müssen zu Anweisungen für die jeweilige Bedienung der Steuerungselemente (Wehre, Einlässe usw.) verarbeitet werden. Für den Rhein ist ein solches mathematisches Modell schon im Aufbau.

Die Einrichtungen für die schnelle Übermittlung sowohl der beim Rechenzentrum eingehenden Meßdaten als auch der dort erarbeiteten jeweiligen Bedienungsanweisungen müssen ebenfalls geschaffen werden.

Die Einführung des Kippbetriebes setzt außerdem noch eine hochentwickelte Hydrometrie und eine kurzfristige Abflußvorhersage voraus.

An allen Wehren und Kraftwerken der Staukette sowie an allen Ein- und Auslaßbauwerken der Retentionsräume muß jederzeit der Abfluß ausreichend genau bestimmt werden können. Untersuchungen zur Abflußbestimmung in Stauhaltungen auch bei in Grenzen variablem Stauziel sind am Rhein begonnen worden. Wenn hier auch noch eine große Aufgabe zu bewältigen ist, so ist eine für den Kippbetrieb ausreichend genaue Abflußermittlung sicherlich möglich.

Eine kurzfristige Abflußvorhersage in dem Umfang, wie sie für den Kippbetrieb erforderlich ist, erscheint am Rhein möglich. Sie braucht nur die Zeit zu überbrücken, die von der Messung der gewässerkundlichen und u. U. meteorologischen Daten bis zur Ausführung der im Rechenzentrum ausgearbeiteten Bedienungsanweisungen vergeht.

Schriftumsverzeichnis

- [1] TEUBER, W.: Kontinuierliches Abflußvorhersagen mittels mehrfacher linearer Regression, Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig, 1970
- [2] EFROYMSEN, M. A.: Multiple Regression Analysis, Mathematical Methods for Digital Computers, Teil. V (17), hrsg. v. A. Ralston und H. S. Wilf, Wiley, N.Y., 1960
- [3] DIXON, W. J.: BMD-Biomedical Computer Programs, Health Sciences of Preventive Medicine and Public Health School of Medicine, Univ. of California, Los Angeles 1965
- [4] LUGIEZ, F., P. Kasser, H. Jensen und P. Guillot: La Prévision des Débits du Rhin. Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology, XIV, 1 - 3/1969
- [5] BUZENGEIGER, G.: Entwicklung der Schifffahrt auf Flüssen mit geringer Wassertiefe. Verbesserung der Schifffahrt durch Zuschußwasser aus Speicherbecken, dargestellt am Beispiel der Weser. XX. Internationaler Schifffahrtskongreß, Baltimore 1961, Abteilung I, Mitteilung 2
- [6] SCHMIDT, F.: Wasserwirtschaftliche Aspekte für den Umweltschutz in Baden-Württemberg, Sonderdruck, Druckhaus Schwaben, Stuttgart 1971
- [7] BENSING, W.: Gewässerkundliche Probleme beim Ausbau des Oberrheins, Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, Heft 4, 1966
- [8] NEUMULLER, M. und BERNHAUER, W.: Stauregelung und Abflußregelung an Laufwasserkraftwerken, Die Wasserwirtschaft, Heft 10, 1969
- [9] WITTMANN, H. und BLEINES: Kraftwerkschwalle und Schifffahrt, Schweizerische Bauzeitung, Nr. 34, 1953
- [10] GOSSLER, D.: Die Einsatzbereitschaft von Pumpspeichersätzen, Schweizerische Bauzeitung, Heft 23, 1969