Kleine vs. große Talsperren in der Entwicklung der Wasserressourcen

Large versus small Dams and Reservoirs in Water Resources Development

Friedrich Fahlbusch

Abstract

This paper addresses the question of optimal choice, from the standpoint of maximum environmental protection, among the two options of water resources development: large number of small reservoirs and dams or a small number of large reservoirs

As a rule, development by small dams performs better environmentally both for hydropower and storage project. In the case of hydropower development, plants with long tunnels are particularly environmentally friendly. In the case of storage project a distinction exists between projects volume allocation or streamflow regulation. Under certain conditions, large dam developments may be syperior to smal dam development for the volumen allocation.

Zusammenfassung

Bei diesem Beitrag geht es um die Frage der vom Standpunkt der maximaler Umweltverträglichkeit güstigeren der beiden Ausbauformen: Eine große Zahl kleiner Speicher oder eine kleine Zahl großer Speicher.

Grundsätzlich zeigten die Untersuchungen, dass von den beiden Optionen ein Ausbau mit kleinen Sperren die bessere Lösung ist Wasserkraftanlagen mit langen Tunneln sind besonders umweltfreundlich. Auch bei Speicherprojekten stellen kleine Sperren die optimale Ausbaustrategie dar, allerdings hängen in diesem Falle die Kriterien nicht nur von der Änderung der Umwelteinwirkung mit der Höhe der Sperre, sondern auch vom Zweck der Anlage ab. D. h., dass bei Aufteilung eines bestimmten Wasservolumens auf mehrere Speicher andere Kriterien gelten als bei Abflussregulierung mit vorgeschriebener Entnahme.

1 Einleitung

Beim Ausbau von Wasserressourcen hat man die Wahl zwischen mit einer großen Zahl kleiner Speicher oder eine kleinen Zahl großer Speicher. Die Entscheidung ist eine Frage der Wirtschaftlichkeit und den sozial-ökologischen Umweltauswirkung. Über diesen Gegenstand hat man seit Jahrzehnte lebhaft diskutiert, zur einer gemeinsamen Auffassung hat es noch nicht gereicht. Die Dissonanz ist nicht allein bei den sozial-ökologische Aspekten und Kosten, zu suchen, es liegt auch an der unzutreffenden Vorstellung, allein komplizierte Modelle und großer Aufwand könnten die Frage klären.

Eine gewisse Ausnahme in der Literartur machen die beiden Artikel, [1], [2], sie sperchen einige der offenen Frage an und legen Teillösungen vor. In [1] wird am Problem der Zuweisung eines bestimmten Volumen auf ein beziehungsweise zwei Speicher gezeigt, dass die Umweltbelastung bei zwei kleineren Talsperre höher ist als bei einer einzigen, große Sperre. Und in [2] kommt der Verfasser beim Vergleich von Laufkraftwerken zum Schluss, dass die Umweltbelastung von einer Vielzahl kleinerer Anlagen vergleichbar, z. T. sogar gravierender sein kann als bei wenigen großen Anlagen. Beide Schlüsse sind aber, wie nachfolgende gezeigt wird, Sonderfälle.

Dieser Beitrag ist ein Versuch, vom Standpunkt der Umweltverträglichkeit, den Meinungen zur Frage welche, der beiden, Entwicklungstrategie : große Zahl kleinere Sperren vs. kleine Zahl großer Sperren den Vorzug zu geben ist, konkrete, nachvollziehbare Antworten entgegen-zustellen

Belastung

Modelle sind Abstraktionen der Wirklichkeit. Die Erfahrung zeigt, dass in vielen Fällen des praktischen Wasserbaus mit einfache Modellen nicht weniger zuverlässigere Ergebnisse erzielt werden können, als mit verwickelten Formulierungen. Ein Polynom der Form z. B.

$$E = k_1 A^{\gamma} \tag{1}$$

worin A die Oberfläche des Stausees bezeichnet, die eine Funktion der Sperrenhöhe ist, bietet eine ebenso brauchbare Basis zur Beschreibung des bio-physikalischen und sozial-ökonomischen Belastung von Talsperren, wie anspruchvollere Formulierungen. Für den Exponent muss gelten, $\gamma \gtrsim 1$, denn eine mit der Höhe abnehmende Belastung würde sowohl dem Sachverhalt als auch der Erfahrung widersprechen.

Gl.(1) wird im Folgenden in Kombination mit den Flächen- und Speicherinhaltslinien

$$A = k_2(x) h^{\alpha}$$

und (2)

$$V = k_3(x) h^{\beta} \tag{3}$$

benutzt, um die Belastung als Funktion der Höhe zu beschreiben. Der Exponent α bewegt sich zwischen 1 und 2 und β, der mit α durch $\beta = \alpha + 1$ zusammenhängt, zwischen 2 und 3. Der Koeffizient andererseits schwankt in der Regel je nach Flussgebiet in weiten Grenzen, und nimmt in Fließrichtung, mit dem Aufweiten der Flusstäler, zu.

2 Laufkraftwerke

2.1 Anlagen ohne Tunnel und Kanäle

Zunächst sei der Fall einer Flusstrecke mit konstanter Breite behandelt. Die Sohlneigung sei J, Länge L und Gesamtfallhöhe H, die mittels n Projekten entwickelt werden soll. Die n Projekte liegen im gleichen Abständen Δx von einander entfernt und die Krafthäuser seien in unmittelbarer Nähe der Sperren angeordnet. Die Fallhöhe eines jeden der n Projekte in Reihe ist $h = H/n$. Gl.(2) in Gl.(1) eingesetzt, ergibt mit $\lambda = \alpha\gamma$, die Belastung E eines des Projektes i in der Entfernung $i\Delta x$ vom oberen Ende der Flussstrecke wie folgt

$$E = ki\Delta x h^{\lambda} \tag{4}$$

mit k = k2k3.

Durch Einsetzen von Δx=h/J erhält man

$$E = \frac{k}{J} i h^{\lambda+1} \tag{5}$$

und die Summe der Impacts der n Sperren und Speicher lautet

$$E_T = k / J(1h^{\lambda+1} + 2h^{\lambda+1} + 3h^{\lambda+1} + ... + i3h^{\lambda+1} + ... + nh^{\lambda+1}) \tag{6}$$

oder in Summenform

$$E_T = k / Jh^{\lambda+1} \frac{n(n+1)}{2}$$

worin der Ausdruck n(n-1)/2 die bekannte, von C. Gauß entdeckte, Summenformel für die natürlichen Zahlen von 1,2...n ist. Durch Substitution von h=H/n und Umordnen folgt der Ausdruck,

$$E_T(n) = \frac{k}{2J} H^{\lambda+1} \frac{n+1}{n^{\lambda}} \tag{7}$$

der für jede beliebige Zahl von Projekten gültig ist. Für einen Ausbau mit m statt n Projekten gilt

$$E_T(m) = \frac{k}{2J} H^{\lambda+1} \frac{m+1}{m^{\lambda}}$$

Angenommen n ≥m, damit $E_T(n) \le E_T(m)$ muss die Ungleichung

$$\frac{1+n}{n^{\lambda}} \le \frac{1+m}{m^{\lambda}} \tag{8}$$

erfüllt sein, welche umgeformt lautet

$$\left(\frac{m}{n}\right)^{\lambda} \le \frac{m+1}{n+1} \tag{9}$$

Angenommen n=m+1, so erhält man für $E_T(n) \le E_T(m)$ die Bedingungen

$$\left(1 - \frac{1}{n}\right)^{\lambda} \le 1 - \frac{1}{n+1} \tag{10}$$

Da λ ≥1, d.h. die Ungleichung Gl. (10) ist stets erfüllt. Mithin ist die Belastung bei einer großen Zahl von kleinen Projekten immer geringer ist als jene, verursacht von einer kleineren Zahl von großen Projekten. Infolge λ ≥1, gelangt man zu diesem Schluss auch durch Deduktion..

Lässt man die Restriktion gleicher Talbreite und konstanter Sohlneigung fallen lassen, und betrachtet man die Koeffizienten, k2, k3, als Funktionen der Sperrenstelle x, so erhält eine Formulierung, die das Aufweiten des Flusstals berücksichtigt und der Wirklichkeit entgegenkommt. An der Schlussfolgerungen des letzten Paragraph ändert sich im Prinzip damit aber nichts.

Eine analytische Lösung für den Fall ohne Restriktion gleicher Fallhöhe ist nicht bekannt. Man kann aber die Aufgabe als Mehrstufenprozess aufzufassen, speziell als ein Problem des "kürzesten Weges" , und mit Dynamischem Programmieren lösen [3], [4]. Es reicht aber schon eine Analyse der Struktur der Aufgabe und des Lösungsweges, um, unter Beachtung der Bedingung $h_i \leq h_{i-1}$ (sie schließt den Einstau oberhalb liegender Sperren aus), zu erkennen, dass niedrige Sperren in größerer Zahl umweltfreundlicher sind als eine kleine Zahl großer Sperren.

2.2 Anlagen mit Tunnel und / oder Kanäle

Sperren und langen Tunnels bieten vom Standpunkt der Umweltverträglichkeit sehr attraktive Lösungen, wie im Folgenden gezeigt wird.

Zu diesem Zweck sei ein Flußabschnitt mit der Fallhöhe H und Entwicklung mit n Wasserkraft-anlagen betrachtet. Nimmt man nun an, p der n Anlagen bleiben erhalten, und der Rest n-p werden durch Tunnel von gleicher Länge und in gleichen Abschnitten ersetzt. Die gesamte Fallhöhe sei in beiden Fällen dieselbe. Die Belastung der p Anlagen, ist wie leicht einzusehen um den Faktor p/n geringer, als bei Entwicklungen ohne Tunnel.

Den Ausdruck für die gesamte Belastung erhält man wie oben. Jener zufolge der n Anlagen gibt Gl.(7) und für eine Entwicklung mit nur p Sperren gilt

$$E_T = \frac{k}{2J} H_D^{\lambda+1} \frac{p+1}{p^\lambda} \tag{11}$$

worin H_D die Fallhöhe der p Sperren bezeichnet. Die Bedingung für den Vorzug eines Ausbau mit Tunnel statt ohne Tunnel folgt daraus zu

$$H_D^{\lambda+1} \frac{p+1}{p^\lambda} \leq H^{\lambda+1} \frac{n+1}{n^\lambda} \tag{12}$$

die alternativ wie folgt geschrieben werden kann

$$\frac{p+1}{p^\lambda} \leq \left(\frac{H}{H_D}\right)^{\lambda+1} \frac{n+1}{n^\lambda} \tag{13}$$

und stets erfüllt ist, da $\lambda \geq 1$. Im Hinblick auf Verträglichkeit ist der Ausbau mit Tunneln offensichtlich jenem ohne Tunnels überlegen.

Ersetzt man $H=H_D + H_T$ so lautet Gl.13

$$\frac{p+1}{p^{\lambda}} \leq (1+\frac{H_T}{H_D})^{\lambda+1}\frac{n+1}{n^{\lambda}}$$

und durch Umformen erhält man schließlich

$$(\frac{n}{p})^{\lambda}\frac{p+1}{n+1} \leq (1+\frac{H_T}{H_D})^{\lambda+1} \tag{14}$$

worin der Ausdruck auf der rechten Seite ein Maß für die Belastung darstellt. Wie ersichtlich, ist die Belastung umso kleiner, je größer der Ausdruck auf der rechten Seite von Gl.14, der denselben Sachverhalt wie das Scale Distinction Criteria von Gleick ausdrückt.

3 Speicherprojekte

3.1 Umwelteinwirkung (Belastung)

Folgenden Ausdruck für die Belastung E von Speicherprojekten als Funktion deren Volumens erhält man aus der Kombination der Gleichungen (1), (2) and (3)

$$E = k_4 V^{\omega} \tag{14}$$

worin ω=γα/β =γα/(α+1) und k4 jeweils Konstanten sind. Die Belastung von n Reservoirs in Reihe, jedes mit einem Volumen von V_n, ist

$$E_n = k_4 n V_n^{\omega} \tag{15}$$

und denselben Ausdruck für m Reservoirs erhält man indem man n durch m ersetzt.

Daraus folgt die Bedingung $E_n \leq E_m$ bei n ≥m

$$\frac{n}{m} \leq (\frac{V_m}{V_n})^{\omega} \tag{16}$$

bei der es sich um eine notwendige Bedingung handelt, die sowohl für die Volumenzuteilung als auch die Entnahme erfüllt sein muss.

3.2 Zuteilung

Das Problem besteht darin, eine bestimmtes Wasservolumen V auf 1,2,3,4,... .n beziehungsweise 1,2,3,4,…m Speicher gleicher Kapazität aufzuteilen. Die Lösung muss neben der notwendigen Bedingung Gl (16) auch noch die Kontinuitätsbedingung, Gl.17 befriedigen

$$V = mV_m = nV_n \tag{17}$$

Gl. 17 in Gl. 16 eingesetzt liefert folgendes Kriterium

$$\left(\frac{n}{m}\right) \leq (\frac{n}{m})^{\omega} \tag{18}$$

woraus ersichtlich, dass im Falle $n \geq m$, $E_n \leq E_m$ nur dann möglich ist , wenn die Ungleichungen

$$\omega \geq 1 \tag{19}$$

beziehungsweise

$$\gamma \geq \frac{\beta}{\alpha} \tag{20}$$

erfüllt sind. Im Bereich der üblichen Werte von α und β, bewegt sich der Quotient β/α um etwa 1.5 d.h. β/α ≤~ 1.5 ist der Ausbau mit wenigen großen Sperren, einem solchen mit mehreren kleinen Sperren überlegen. Dieses Ergebnis enthält jenes von Hawn als Sonderfall γ=1. Bei β/α > 1.5 ist der Ausbau mit kleinen Speichern die vom Standpunkt der Umweltveträglichkeit zu bevorzugende Lösung.

3.3 Entnahme

Die Aufteilung eines bestimmten Wasservolumens auf mehrere Speicher ist relativ selten in der Praxis, häufiger stellt sich die Aufgabe der Abflussregulierung d. h. eine gewünschte gleichmäßige Entnahme mittels einer Reihe von hintereinander liegenden Speichern sicherzustellen. Das dafür nötige, gesamte Speichervolumen ist eine Funktion des natürlichen jährlichen Abflusses und dessen Schwankungen, der Zahl der Speicher, der Entnahmeregel, beziehungsweise des Speicherbetriebs und der Versorgungssicherheit.

Für einen gegebenen Speicherbetrieb und eine bestimmte Versorgungssicherheit lautet die Speicher-Wirkungslinie $V/I=\sigma=\Phi(\rho,C_v)$. Darin bezeichnen ρ und σ Ausbaugrad und Ausgleichs-grad, d. h. Speichergröße und Entnahme bezogen auf die mittlere Jahreswasserfracht I, beziehungsweise den mittleren jährlichen Abfluss Q und Cv den Variationskoeffizienten des jährlichen Abflusses.

Angenommen der Zufluss I zur ersten Sperre sei der einzige natürliche Input in die Speicherkette, dann besteht der Zufluss in den Speicher i aus dem Überfall des Speichers i-1, d. h. die Zuflüsse nehmen flussabwärts ab, $I_i \leq I_{i-1}$, und der Variationskoefficient zu, $C_{vi} \geq C_{v,i-1}$. Die Zunahme ist exponentiell nach der Beziehung $C_{vi}= f(C_{v,i-1},\rho_i)$. In dem Maße, in dem C_v sich erhöht, reduziert sich die Fähigkeit der Speicher, den Zufluss zu regulieren.

Für $n \geq m$ muss nunmehr nicht nur die Bedingung Gl 16, sondern auch die Nebenbedingung $R_n = R_m$ erfüllt sein, um damit die Ungleichung $E_n \leq E_m$ zu befriedigen. Diese Nebenbedingung schränkt zwar den Lösungsraum ein, da nur Lösungen gleicher Entnahmen in Frage kommen, sie schließt aber auch eine analytische Lösung aus. Eine numerische Lösung folgenden Gleichungssytems nach der Versuch-und-Irrtum-Methode für n=1,2,3 ... ist allerdings durch-führbar, indem man die Entnahme aus den einzelnen Speichern solange variiert bis die angezielte Entnahme den Wert R_o erreicht.

$I_1 = I_0$

$C_{v1} = C_{v0}$

$V/I=\sigma=\Phi(\rho, C_v)$

$C_{vi}= f(C_{v,i-1},\rho_i)$.

Für ein konkretes Projekt mit mehreren Talsperren mit mittlerem jährlichen Zufluss I= 19 m3 /s und Variationskoeffizient Cv = 0.5 ist die Lösung in **Tabelle 1** zusammengestellt. Vereinfachend wurde der Einfluss der Versorgungssicherheit und die Wahrscheinlichkeitsverteilung der natürlichen Wassermengen auf die Entnahme außer Acht gelassen. Der Stauraum wurde nach der empirischen Speicherwirkungslinie

$$R = \rho I = 0.6\left(\frac{\sigma}{C_v^2}\right)^{0.28} I$$

berechnet, deren Struktur zunächst aus den Angaben von Dyck und Glos [5] und Hurst [6] ermittelt wurde, mit anschließender Justierung an den Hauptdaten des Projekts. Für den Zusammenhang $C_{vi}= f(C_{v,i-1},\rho_{i-1})$ wurde die lineare Approximation $C_{vi}=(1+1.2\rho_i)C_{v,i-1}$ verwendet, die aus synthetischen jährlichen Abflussreihen mit rein stochastischen und Markov-Eigenschaften abgeleitet wurde.

Die letzte Spalte in Tabelle 1 zeigt die Belastung für ein- und dieselbe Entnahme einer Mehr-Sperren-Entwicklung im Vergleich zu jener mit nur einer Sperre. Die Belastung nimmt, wie zu erwarten, mit der Zahl der Sperren exponentiell ab, etwa grob nach E ~ exp(-0.4n). Das Ergebnis zeigt, dass in diesem speziellen Falle, die Verträglichkeit bei zwei bis drei kleinen Sperren wahrscheinlich spürbar höher gewesen wäre. Ferner, das Projekt ist für einen aus dem Erfahrungsrahmen fallenden, hohen Ausgleichsgrad von ρ=0.94 ausgelegt, der offensichtlich in den Projektdaten seinen Ausdruck findet, die Schlussfolgerungen dennoch nicht berührt.

Tabelle 1:

Table 1												
Zahl der Sperren	Volumen	Zufluss	Zufluss	Cv	Sigma	Rho	Entnahme	Entnahme	Entnahme der Reihe	Volumen der Reihe	Sperren hoehe	Relative Belastung
	MCM	MCM	M3/S	-	-	-	MCM	M3/S	M3/S	MCM	M	E
1	1500	600	19,0	0,50	2,500	0,942	565	17,9	17,9	1500	170	1,00
2	355	600	19,0	0,50	0,592	0,629	377	11,9				
2	355	223	7,0	0,88	1,595	0,830	185	5,8	17,8	710	110	0,63
3	130	600	19,0	0,50	0,217	0,475	285	9,0				
3	130	315	10,0	0,78	0,412	0,569	179	5,7				
3	130	136	4,3	1,32	0,956	0,719	98	3,1	17,8	390	80	0,42
4	60	600	19,0	0,50	0,100	0,382	229	7,3				
4	60	371	11,7	0,73	0,162	0,438	162	5,1				
4	60	208	6,6	1,11	0,288	0,514	107	3,4				
4	60	101	3,2	1,80	0,592	0,629	64	2,0	17,8	240	70	0,30
5	32	600	19,0	0,50	0,053	0,321	192	6,1				
5	32	408	12,9	0,69	0,079	0,357	146	4,6				
5	32	262	8,3	0,99	0,122	0,404	106	3,4				
5	32	156	4,9	1,47	0,205	0,467	73	2,3				
5	32	83	2,6	2,29	0,385	0,558	46	1,5	17,8	160	60	0,23

Das Ergebnis in **Tabelle 1** wurde im Prinzip von anderen Kombinationen von jährlichen Wassermengen, Variationskoeffizienten, Speicherkapazitäten und Entnahmen bestätigt.

4 Zusammenfassung

Die Wirklichkeit in einem konkreten Fall mag zwar der Entscheidung Zwänge auferlegen die weder Theorie noch Modell erfassen können und die letztlich dann auch entscheidend sein mögen. Dennoch kann man vor der Tatsache, dass vom Standpunkt der Umweltverträglichkeit der Ausbau mit einer größeren Zahl niedriger Sperren dem Ausbau mit einer kleineren Zahl von großen Sperren generell überlegen ist, die Augen nicht verschließen. Ausgenommen sind Situationen mit linearer Zunahme der Belastung mit Sperrenhöhe, in diesem Falle stellt sich die Frage groß vs. klein nicht.

Das Gesagte gilt sowohl für Wasserkraft, als auch jede andere Entwicklung der Wasserressourcen, die große Talsperren und Regulierung des natürliche Abflusse enthalten. Wasserkraftentwicklung sollte, im Rahmen des technisch und ökonomisch Vertretbaren, stets mit niedrigen Sperren und Tunnels erfolgen, es sei denn, die lokalen Gegebenheiten und Besonderheiten zwingen zu einer anderen Ausbauform.

Die üblichen technischen und wirtschaftlichen Maßstäbe und unzureichende Integration der Umweltauswirkungen in die Projektbewertung sind häufig Ursache für unbefriedigende Ausbaupläne. Jedes große Projekt mit potentiell signifikanter negativer Umwelteinwirkung sollte deshalb stets mit zwei oder mehr niedrigeren Sperren verglichen werden, mit Ausnahme natürlich von Situationen, die die Mehrspeicherlösung von vornherein ausschließen.

Literatur

[1] Gleick, P.H., “Environmental consequences of hydroelectric development: The role of facility size and type”, Energy Vol.17, No.8, Pergamon Press Ltd; 1992.

[2] Haws,T., “Dam co-operation”; Dam Engineering, Vol. 5, Issue 4; December 1994.

[3] Fahlbusch, F.E., “ Optimum River Basin Planning, a shortest Route Problem of Dynamic Programming”

[4] Bellman, R.E., “Dynamic Programming, Princeton University Press”, Princeton 1957

[5] Dyck, S. and E.Glos, “Langfristiger Ausgleich natürlicher Abflussschwankungen der Flüsse durch Talsperren”, Wasserwirtschaft-Wassertechnik, Januar 1957

[6] Hurst, H.E., R.P.Black, and Y.M. Simaika, “ Long-Term Storage”, Constable & Co, London 1965

Anschrift des Verfassers

Dr.-Ing. Friedrich E. Fahlbusch
63391 East Squash Blossom Lane
Tucson, Arizona, 85739
USA
FEF1000@aol.com