

# Die Auslegung und Wirtschaftlichkeit von Restwasserkraftanlagen bei Großprojekten in der Türkei

Ronald Haselsteiner, Burcu Ersoy

In der Türkei ist derzeit eine Vielzahl an großen Wasserbauprojekten in Planung und im Bau. Die umwelttechnischen Auflagen sehen bei Ausleitungen einen Restwasserabfluss vor, der saisonabhängig 10-20 % des mittleren Abflusses beträgt. Die energetische Nutzung dieses Restwasserabflusses ist natürlich wirtschaftlich. Die Auslegung der Restwasserkraftwerke wird dabei von den lokalen Randbedingungen bestimmt, was zu sehr unterschiedlichen Kraftwerken führt, wie an ausgewählten Projektbeispielen gezeigt wird.

In Turkey a great number of large hydropower projects is in planning stage or under construction. The environmental regulations stipulate an environmental flow for projects with diversion or energy tunnels. This flow differs seasonally from 10-20 % of the annual average flow. The energetic utilization is certainly profitable. The design of the environmental powerhouses is dominated by the local constraints, which is resulting in considerable different powerhouses as shown by selected case studies.

## 1 Einleitung

Derzeit sind in der Türkei zahlreiche große Wasserkraftprojekte im Bau oder in der Planungsphase (Haselsteiner et al., 2009a, b). Die Restwasserforderung führt zu einer mehr oder weniger großen Verminderung der möglichen Stromerzeugungsgewinne. Da nach der aktuellen Gesetzeslage die Mindestrestwasserabgabe als Prozentsatz des mittleren jährlichen Abflusses festgesetzt wird, werden zur Nutzung dieses Abflusses Restwasserkraftwerke mit einem hohen Auslastungsgrad errichtet.

Für den Fall, dass mehrere Nutzungsansprüche, wie z. B. Bewässerungsabgaben oder Hochwasserschutz, bestehen, hilft es, eine Priorisierung der konkurrierenden Nutzungen durchzuführen, wobei der Restwasserabgabe i. d. R. eine hohe Priorität zugesprochen wird, da umweltrelevante Aspekte direkt das Allgemeinwohl betreffen. Wenn konkurrierende Nutzungsansprüche aufeinandertreffen, wie z. B. Naturschutz und Hochwasserschutz, muss im Rahmen einer Reservoirnutzungsoptimierung eine Priorisierung im Rahmen eines Managementplanes umgesetzt werden. Bis dato kollidieren meistens Bewässerungs- und Restwasservorgaben mit den Ansprüchen der



Seit durchgeführte Abflusspegel-Messungen, der letzten zehn Jahre. Hieraus werden die notwendigen hydrologischen Größen ermittelt und für die Festlegung der Restwasserabgabe verwendet. Meist wird ein Prozentsatz des mittleren jährlichen Abflusses als Mindestrestwasserabgabe festgelegt.

Die Festlegung des Restwasserabflusses ( $Q_R$ ) kann nach Özdemir et al. (2009) nach der Tennant-Methode (Tennant, 1976) erfolgen, welche vorsieht, dass je nach Fließgewässer 10-30 % des Abflusses in der Restwasserstrecke verbleiben muss. Da in der Türkei extreme saisonale Schwankungen auftreten, wird nicht selten zwischen Regenzeiten (R) und Trockenzeiten (T) unterschieden:

- $Q_{R,T} = 10 \% \cdot MQ_{10a,T}$
- $Q_{R,R} = 20 \% \cdot MQ_{10a,R}$

Bestehen ältere Genehmigungen wird noch mit weniger als 10 % gerechnet, was jedoch zukünftig im Zuge der Gesetzesnovellierung angepasst werden wird. Eine ökologische Bewertung der betroffenen Gewässerstrecken erfolgt meist nur auf theoretischer Basis. Fischökologische Erhebungen und eine gewässerspezifische Ermittlung des notwendigen Abflusses werden i. d. R. nicht durchgeführt oder hat bei der Genehmigungsbehörde wenig Anklang, da die Ergebnisse nicht selten von den herkömmlich verwendeten, einfachen und deshalb transparenten Verfahren abweichen.

### 3 Entwurf von Restwasserkraftwerken

Wie im folgenden Abschnitt anhand der Projektbeispiele noch dargelegt wird, sind je nach Randbedingungen unterschiedliche Möglichkeiten in Betracht zu ziehen, ein Restwasserkraftwerk zu positionieren und auszulegen.

Ziel ist es stets, die vermeintliche Restwasserstrecke zu speisen und den dafür vorgesehenen Abfluss energetisch nahe am Absperrbauwerk zu nutzen. Dadurch werden zusätzliche (hydraulische) Verluste vermieden und bauliche Kosten reduziert.

Die Auslegung der Maschinen erfolgt i. d. R. für den Dauerbetrieb. Aufgrund der jahreszeitlich unterschiedlichen Restwasserabflüsse werden i. d. R. zwei gleiche Maschinensätze verwendet, von welchen je einer 10 % des Mittelwasserabflusses nutzt. Maximal werden somit während der Regenzeit, welche i. d. R. drei bis vier Monate umfasst, bis zu 20 % des Mittelwasserabflusses durch das RKW energetisch genutzt.

Die Speichergröße spielt für die Energieerzeugung des RWK im Vergleich zum HKW eine untergeordnete Rolle und kommt nur zum Tragen, falls der Speicher leer laufen sollte.

Aufgrund der Regelungsmöglichkeiten der Turbinen und des Betriebs auch bei geringen Abflüssen kommt es i. d. R. kaum zu Stillstandszeiten des RKW.

Wartung und Revision haben praktisch keinen Einfluss, da einer der Maschinensätze eines Großteils des Jahres theoretisch außer Betrieb ist. Die Anordnung von nur einem Maschinensatz ist aus verschiedenen Gründen im Hinblick auf Betrieb, Wirkungsgrad und Wirtschaftlichkeit nicht optimal.

Je nach Randbedingungen können folgende Anordnungen der Kraftwerke unterschieden werden:

- Typ I: Zwei komplett getrennte Systeme mit jeweils einem Kraftwerk, einer Zuleitung und einem Umspannwerk mit Hochspannungsleitung. Dies ist dann der Fall, wenn das Hauptkraftwerk über einen Druckstollen oder Kanal mit dem Reservoir verbunden ist.
- TYP II: Ein Kombinationkraftwerk mit i. d. R. zwei Maschinen für die Restwassernutzung und einem Maschinensatz für die Hauptnutzung. (Abb. 2). Je nach Auslegung der Hauptmaschinensätze kann die Anzahl und Auslegung variiert werden. Im Allgemeinen bietet es sich jedoch an, mit gleichen Maschinensätzen zu arbeiten. Besonders bei Auslegung der großen Turbinen für Spitzenstromerzeugung sind zwei kleinere Maschinensätze von Vorteil.

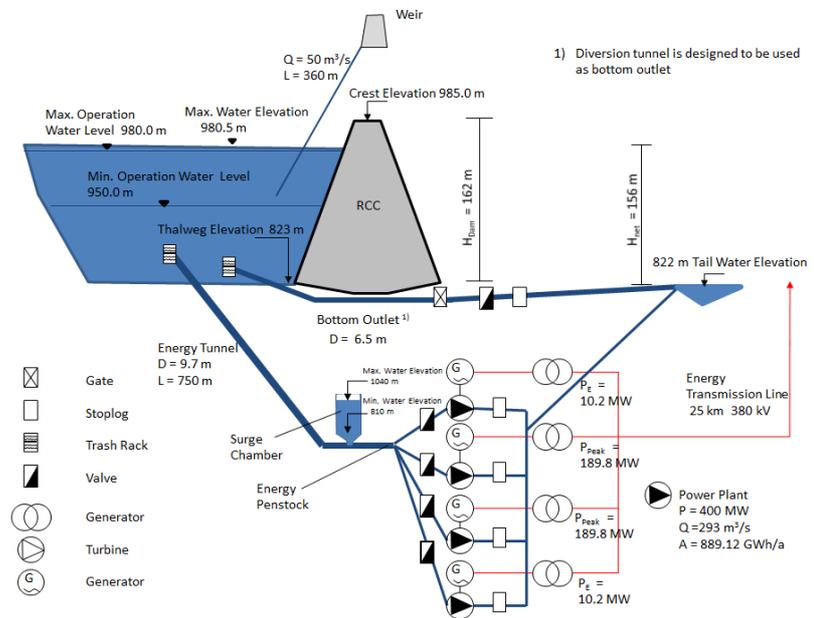
Die Lage des Restwasserkraftwerks oder des Kombinationsbauwerks ist von den für die Planung und den Bau von Wasserkraftanlagen üblichen Randbedingungen abhängig. Die Geologie und die Topographie sowie die Lage und Art der Hauptsperre bestimmen hierbei den Standort.

In Abb. 2 ist eine Anlage mit Kombinationskraftwerk skizzenhaft dargestellt. Zwei Turbinen sind für den Dauerbetrieb und zur Abarbeitung des Restwasserabflusses ausgelegt. Die anderen zwei sind für Spitzenstromerzeugung ausgelegt.

Sofern es sich beim Absperrbauwerk um einen Damm handelt, wird die Wasserzuleitung i. d. R. durch Druckrohre und Druckstollen bewerkstelligt, die am Absperrbauwerk geführt werden. Hierfür bieten sich die i. d. R. bestehenden Umleitungstollen und die Bereiche an den seitlichen Widerlagern an. Bei vielen großen Anlagen mit Restwasserkraftwerken werden zwei gleiche Umleitungstollen angeordnet, von denen einer als Grundablass nachgerüstet und genutzt und der andere nach der Umleitungsphase mit einer Druckrohrleitung und den zugehörigen Armaturen ausgestattet wird. Ist nur ein

Tunnel vorhanden, können auch beide Rohre dort verlegt oder das Restwasserkraftwerk mittels einer Nebenleitung versorgt werden.

**Abbildung 2**  
Schematische Darstellung eines Kombinationskraftwerks mit zwei Restwasserturbinen und zwei Spitzenstromturbinen (Status: Vertiefte Machbarkeitsstudie, Pervari)



Letzteres ist zu hoher Wahrscheinlichkeit wirtschaftlich, da die höheren hydraulischen Verluste im Falle des gleichzeitigen Betriebs von Grundablass und Restwasserkraftwerk durch die Kosteneinsparungen an Armaturen und Druckrohrleitung aufgewogen werden. Betriebliche Gesichtspunkte stellen i. d. R. für diesen Fall kein Hindernis dar.

## 4 Projektbeispiele

### 4.1 Übersicht

Die Realisierung von Restwasserkraftwerken ist eine projektspezifische Angelegenheit. Demgemäß variieren die Projektkenngößen beträchtlich, wie in Tab. 1 gezeigt wird.

**Tabelle 1** Projektkenntwerte von sechs ausgewählten Projekten

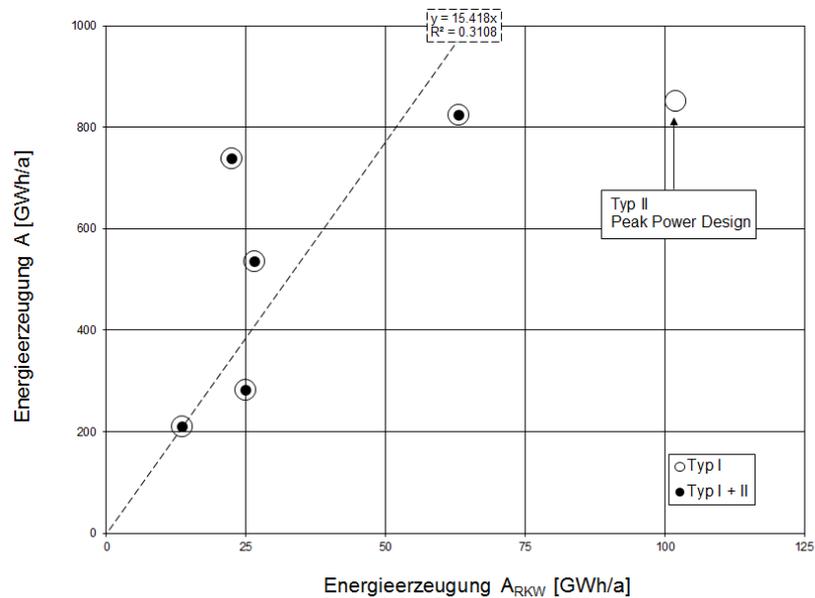
Project		Fluss	Hauptkraftwerk				Restwasserkraftwerk			Gesamt			
Nr.	Name	Fluss	$Q_{m,ges}$ [m³/s]	$H_{KW}$ [m]	$P_{KW}$ [MW]	$A_{KW}$ [GWh/a]	$H_{RKW}$ [m]	$P_{RKW}$ [MW]	$A_{RKW}$ [GWh/a]	$P_{ges}$ [MW]	$A_{ges}$ [GWh/a]	$A_{RKW}/A_{ges}$ [%]	$(H_{KW}-H_{RKW})/H_{KW}$
1	Söylemez	Aras	23	170	32	196	110	2	14	34	209	6.5%	35.3%
2	Sarıgülzel	Ceyhan	49	93	101	257	66	3	25	105	282	8.9%	28.9%
3	Arkun	Coruh	59	192	231	761	121	12	63	243	824	7.7%	37.0%
4	Kavsakbendi	Seyhan	131	77	178	715	67	3	23	181	738	3.0%	12.1%
5	Kandil	Ceyhan	45	213	212	509	99	4	27	216	536	5.0%	53.6%
6	Pervari	Botan	76	156	380	748	156	20	102	400	850	12.0%	0.0%

(Nr. 1-5)	mittel	61	149	151	487	93	5	30	156	518	6.2%	33.4%
-----------	--------	----	-----	-----	-----	----	---	----	-----	-----	------	-------

Bei „normal“ ausgelegten Anlagen wird i. d. R. weniger als 10 % der Gesamtjahreserzeugung mittels der Restwasserkraftwerke produziert. Nur bei Projekt 6 (Tab. 1), das sich noch in einer Art vertiefter Machbarkeitsstudienphase befindet, obgleich bereits eine Ausschreibungsplanung erstellt wurde, übernimmt das Restwasserkraftwerk mit 12 % einen etwas größeren Anteil.

In Abb. 3 sind die jährlichen Erzeugungswerte der Gesamtanlagen denen der Restwasserkraftwerke gegenübergestellt. Die Aussage des angegebenen Diagramms ist begrenzt, jedoch zeigt es tendentiell die Verhältnisse, dass bei Typ I-Kraftwerken die anteilige Arbeitsleistung der RKW einen linearen Zuwachs aufweisen.

**Abbildung 3**  
 Jährliche Gesamtenergieerzeugung A des Haupt- und Restwasserkraftwerks und jährliche Energieerzeugung des Restwasserkraftwerks  $A_{RKW}$  (siehe Tab. 1)

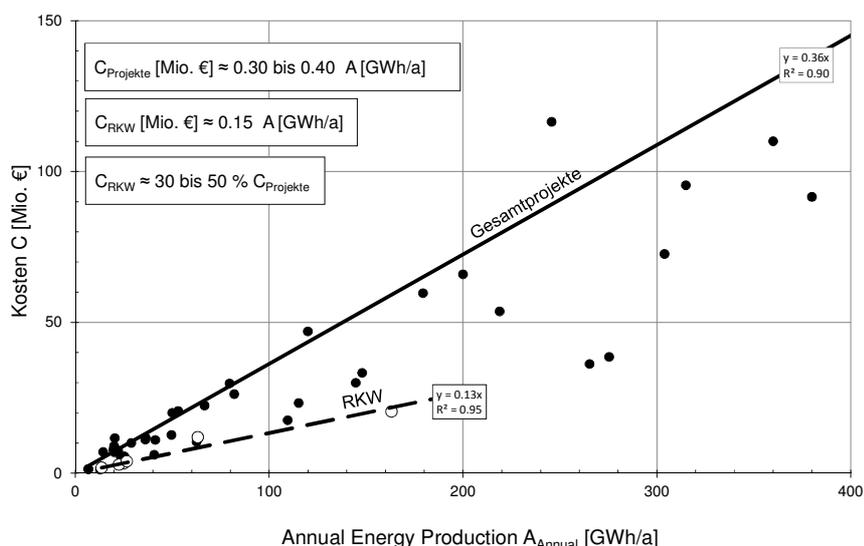


## 4.2 Wirtschaftlichkeit

Anders verhält es sich bei den Kosten, wenn die Kosten für die Anlagenteile der Gesamtanlage nicht anteilmäßig auf die Restwasserkraftnutzung umgelegt werden. In Abb. 4 werden Benchmark-Kenngrößen von türkischen Anlagen mit und ohne Restwasserkraftwerke gezeigt. Die beschriebenen Restwasserkraftwerke sind für sich alleine betrachtet hoch wirtschaftlich, da lediglich die Kosten für die Errichtung des Kraftwerkes selbst, die Bauwerke für die Wasserzuleitung und die Stromleitungsbauwerke zu leisten sind. Dies gilt natürlich nur dann, wenn es sich vom Vorneherein um große Anlagen handelt, bei denen die installierte Leistung und die jährliche Energieerzeugung entsprechend hoch sind.

Bei kleineren, weit abgelegenen Anlagen muss die energetische Nutzung der Restwassermenge nicht unbedingt aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvoll

sein. Bei sehr kleinen oder kleinen Anlagen kann es auch der Fall sein, dass keine Restwasserforderungen aufgestellt werden, da das Fließgewässer eventuell nicht ganzjährig Wasser führt und naturschutzfachliche Gesichtspunkte wie z. B. Fischwanderung, etc. keine Rolle spielen.



**Abbildung 4** Jährliche Gesamtenergieerzeugung und Kosten getrennt für gesamte Wasserkraftprojekte und Restwasserkraftwerke

Letztendlich reduziert die Restwasserabgabe jedoch die Gesamterzeugung im Vergleich zu dem Zustand ohne Restwasserabgabe, was in der Türkei bis dato im Allgemeinen die Wirtschaftlichkeit von mittleren und großen Wasserkraftprojekten auch trotz der hohen Rentabilitätsvorstellungen der Investoren nicht gefährdet.

Wie aus Abb. 4 zu erkennen ist, belaufen sich die Kosten in Anbetracht der erwirtschafteten jährlichen Energieerzeugung bei den Restwasserkraftwerken nur auf etwa 30 % bis 50 % der Kosten der Gesamtprojekte, bei denen alle Anlagenteile zu erbauen sind.

### 4.3 Jahresspeicher mit Restwasserstrecke und separatem Kraftwerk (Söylemez)

Das Projekt befindet sich am Fluss Aras südöstlich der Stadt Erzurum in Ostanatolien. Die Anlage hat einen 115 m hohen Absperrdamm (Steinschüttdamm mit Betonoberflächendichtung) und einen Jahresspeicher. Das sich in der Machbarkeitsstudienphase befindliche Projekt weißt einen Ausleitungsstollen von ca. 6 km auf, weshalb zwei komplett getrennte Kraftwerke in Planung sind. Das Restwasserkraftwerk soll am Fuße des Absperrdamms zum Liegen kommen. Die Zuleitung soll über einen der zwei

Umleitungsstollen erfolgen. Zukünftige Änderungen im Sinne einer Optimierung sind nicht ausgeschlossen.

Im Restwasserkraftwerk sind derzeit zwei Maschinensätze mit Francisturbinen vorgesehen, welche jeweils eine installierte Leistung von  $P = 1$  MW besitzen (siehe Tab. 1).

#### **4.4 Monatsspeicher ohne Restwasserstrecke und kombiniertem Kraftwerk für Spitzenstromgenerierung (Pervari)**

Das Projekt Pervari befindet sich am Fluss Botan im Südosten der Türkei. Der Botan ist ein Zufluss des Tigris unweit der sich im Bau befindlichen Anlage Ilisu, welches derzeit das größte Wasserkraftprojekt der Türkei ist. Das Absperrbauwerk wurde in der Machbarkeitsphase als ca. 165 m hohe RCC Staumauer entworfen. Die Anlage befindet sich in einem geologisch sensiblen Bereich. Die Stabilisierung von zwei großen Hangrutschmassen bedarf eines großen technischen sowie finanziellen Einsatzes, weshalb Überlegungen bestehen, die Dammachse nach oberstrom zu verschieben und aus Kostengründen auch den Sperrtyp zugunsten eines Steinschüttdammes mit Betonoberflächendichtung zu ändern. Der Energietunnel ist ca. 700 m lang und verbindet den Stauraum mit dem Kombinationskraftwerk, das sowohl Spitzenstrommaschinensätze als auch Restwassermaschinen beherbergt.

Im Kraftwerk sind vier Maschinensätze mit Francisturbinen vorgesehen. Zwei davon mit einer installierten Leistung von  $P = 10.2$  MW für die Restwassernutzung und zwei mit  $P = 189.8$  MW für die Spitzenstromerzeugung (siehe Tab. 1, Abb. 2).

#### **4.5 Monatsspeicher mit Restwasserkraftwerk und kombiniertem Grundablass (Arkun)**

Die Anlage befindet sich im Nordosten der Türkei am Fluss Coruh. Die Anlage verfügt über einen 110 m hohen Absperrdamm (Steinschüttdamm mit Betonoberflächendichtung) und einen ca. 14 km langen Ausleitungsstollen. Das Restwasserkraftwerk soll nahe dem einzigen Umleitungsstollen zum Liegen kommen. Die Zuleitung zum RKW erfolgt als Abzweigung vom Grundablass. Die Absperr- und Regelorgane wurden entsprechend den Anforderungen an den Betrieb des Kraftwerks angepasst. Das HKW wurde in Arkun auch für Spitzenstromerzeugung ausgelegt.

Im Restwasserkraftwerk sind zwei Maschinensätze mit Francisturbinen vorgesehen, welche jeweils eine installierte Leistung von etwa  $P = 6$  MW besitzen (siehe Tab. 1).

## Literatur

- Haselsteiner, R.; Ersoy, B. (2010): Untersuchung der Bewirtschaftung eines Jahresspeichers in der Türkei mit Hilfe eines Speichermodells zur Verifizierung und Optimierung der Energieerzeugung. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 11-12/10, S. 220-226
- Haselsteiner, R.; Heimerl, S.; Arch, A.; Kohler, B.; Recla, R.; Bilmez, C.; Mesci, Ü. (2009a): Evaluation of small and medium hydropower in Turkey in consideration of economical aspects. Wasserkraftnutzung im Zeichen des Klimawandels - Waterpower and Climate Change. Dresdner Wasserbaukolloquium 2009, 12.-13. März 2009, Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 39, S. 335-358.
- Haselsteiner, R.; Heimerl, S.; Arch, A.; Kohler, B.; Recla, R.; Bilmez, C.; Mesci, Ü. (2009b): Efficient Design, Construction and Maintenance of Hydropower Plants in Turkey. HYDRO 2009 - Progress, Potential, Plans, International Conference and Exhibition, Lyon, France, 26-28 October 2009.
- Özdemir, A. D.; Karaca, Ö.; Erkus, M. K. (2007): Low Flow Calculation to Maintain Eco-logical Balance in Streams. International Congress on River Basin Management, Antalya 2007.
- Tennant, D. L. (1976): Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation, and related envi-ronmental resources. in Instream flow needs, Volume II: Boise, ID, Proceedings of the symposium and specialty conference on instream flow needs, May 3-6, American Fisheries Society, p. 359-373.

## Autoren

Dr.-Ing. Ronald Haselsteiner,  
EnerjiSA Enerji Üretim A.S.  
Ehli. Mah. Ceyhun Atif Kansu Cd.  
Baskent Plaza No: 106 K: 7-8  
06520 Balgat / Ankara / Turkey  
Tel.: +90 312 583 40 55  
Fax: +90 312 583 85 46  
rhaselsteiner@enerjisa.com.tr

BSc Ersoy Burcu  
Fichtner GmbH & Co- KG  
Büyükdere Cad. Polat Hand No: 87/5  
Mecidiyeköy  
34387 Sisli / Istanbul / Turkey  
Tel.: +90 212 217 17 67  
Fax: +90 212 217 81 24  
burcu.ersoy@fichtner.de