

**Zeitschrift:** Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria  
**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband  
**Band:** 88 (1996)  
**Heft:** 9

**Artikel:** Bestimmung der Energieverluste bei Flusskraftwerken durch Wasserpflanzen  
**Autor:** Abegg, Johannes / Wächter, Kurt  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-940365>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 21.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Bestimmung der Energieverluste bei Flusskraftwerken durch Wasserpflanzen

Johannes Abegg und Kurt Wächter

## 1. Einleitung

Seit Mitte der 80er Jahre lässt der Verband Aare-Rheinwerke im gesamten Hochrhein, in der Aare zwischen Bielersee und Koblenz sowie in der Reuss zwischen Ottenbach und Bremgarten die höheren Wasserpflanzen (Makrophyten<sup>1</sup>) erfassen. Die Resultate dieser periodisch erfolgenden Grobkartierungen (Wächter 1989, Limnex 1995), aber auch Arbeiten früherer Jahre (u. a. von Thomas 1975, Kranich 1976, Knecht 1985) zeigen, dass die Mittel- und Niederflüsse teilweise erheblich verkrautet sind. Vergleichbar etwa mit der Wald- und Wiesenvegetation in der terrestrischen Zone wird die Hydrosphäre durch diese Wasserpflanzen zusätzlich strukturiert, die besiedelbare (Ober-) Fläche beträchtlich vergrößert und das ökologische Spektrum erweitert.

Massenentwicklungen höherer Wasserpflanzen können sich nicht nur auf die Schifffahrt, die Fischerei und den Badebetrieb negativ auswirken (Kunz 1976), sondern beeinflussen auch das Abflussverhalten der Fließgewässer. Konkret verursachen die Wasserpflanzen eine Reduktion des Durchflussprofils sowie eine Veränderung der Gerinnerrauhigkeit (Hagmann 1976). Um den Einfluss auf das Abflussverhalten quantifizieren zu können, wurde versucht, eine Abhängigkeit zwischen Gerinnerrauhigkeit (ausgedrückt durch den Stricklerbeiwert  $k_{Str}$ , Strickler 1923) und Verkrautungsgrad herzuleiten. Anhand der verkrautungsbedingten Änderung von  $k_{Str}$  kann die Erhöhung der Wasserspiegellage berechnet und so auf die Produktionseinbußen bei Flusskraftwerken infolge der reduzierten nutzbaren Fallhöhe geschlossen werden.

## 2. Methodik

Zur Bestimmung des Einflusses der Verkrautung auf die Abflusstiefe wurden in einem ersten Arbeitsschritt in zwei Versuchsstrecken einerseits die Ausbreitung, Mächtigkeit und Bewuchsdichte der Wasserpflanzen bei verschiedenen Vegetationsstadien kartiert, andererseits entlang beider Ufer Wasserspiegellängsprofile in einer kürzeren Periode um den Kartierungszeitpunkt vermessen (Bild 1). Mit diesem Vorgehen konnten jeweils für einen konstanten

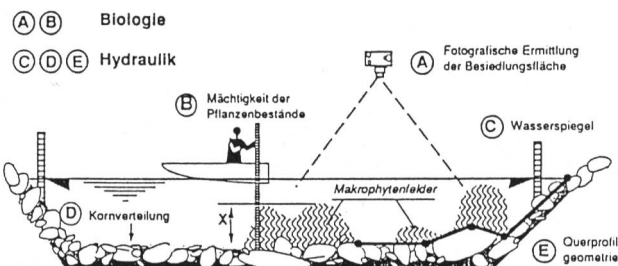


Bild 1. Feldarbeiten zur Erfassung der biologischen und hydraulischen Randbedingungen in den beiden Versuchsstrecken.

<sup>1</sup> Makrophyten umfassen die höheren Süßwasserpflanzen. Dazu gehören Armleuchteralgen, Moose, Farne, Schachtelhalme, Bärlappgewächse sowie Samenpflanzen, sofern deren photosynthetisch aktiven Teile dauernd oder zumindest für einige Monate im Jahr untergetaucht sind oder an der Wasseroberfläche treiben.

Verkrautungsgrad die hydraulischen Verhältnisse bei unterschiedlichen Abflüssen erfasst werden.

Im nächsten Arbeitsschritt wurden die gemessenen Wasserspiegellängsprofile anhand von Staukurvenberechnungen nachgebildet. Dabei wurden die  $k_{Str}$ -Werte der Gerinnerrauhigkeit solange korrigiert, bis die berechneten Wasserspiegellagen mit den vermessenen übereinstimmten (Bild 2). Die Rauigkeitsbeiwerte der Uferbauwerke entsprechen Erfahrungswerten (DVWK 1990) und blieben in den Berechnungen unverändert. Diese Eichrechnungen erlaubten die Bestimmung der krautlosen Gerinnerrauhigkeit bei vernachlässigbar kleinem sowie der Rauigkeit im Sommer bei größerem Bewuchs. Der Vergleich dieser Werte liefert – unter Berücksichtigung des Einflusses der Abflusstiefe – die gesuchte Änderung der Gerinnerrauhigkeit aufgrund der Wasserpflanzen.

## 3. Wahl der Versuchsstrecken

Um die dokumentierten Fließverhältnisse rechnerisch optimal nachbilden zu können, wurden Versuchsstrecken gesucht, die folgende Bedingungen erfüllen:

- 1) Gestreckter und freifließender (ungestauter) Gerinneabschnitt.
- 2) Möglichst einheitliche und trapezförmige Gerinnegeometrie.
- 3) Keine nennenswerten Zuflüsse zwischen der Versuchsstrecke und der nächstliegenden Abflussmessstation.
- 4) Unterschiedliche Verkrautungsgrade in den beiden Versuchsstrecken.

Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen fiel die Wahl auf einen rund 1 km langen Abschnitt am Hochrhein bei Diessenhofen (km 35.200 bis km 34.300) und einen 450 m langen Abschnitt an der Limmat bei Dietikon (km 5.950 bis km 6.400). Bei sämtlichen untersuchten Abflüssen in der Limmat blieben die Vorländer unbenetzt, womit Bedingung 2) eingehalten wurde.

## 4. Resultate

### 4.1 Staukurvenberechnungen

Bild 3 zeigt den Vergleich zwischen der gemessenen und der berechneten Wasserspiegellage vom 15. Mai 1995 in der Versuchsstrecke an der Limmat. Mit den optimierten

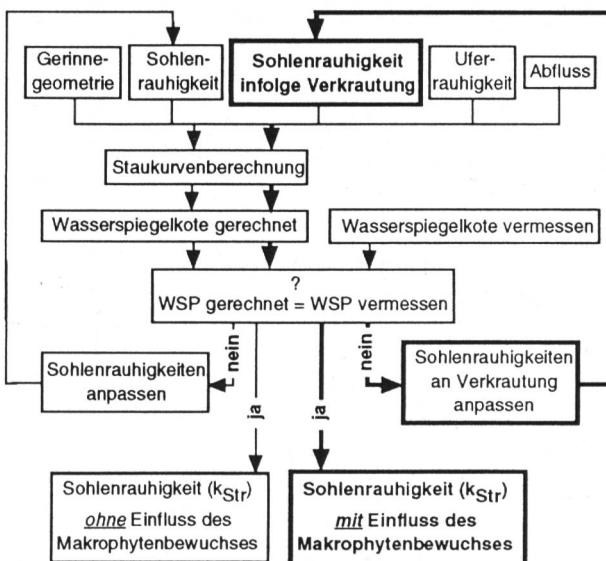


Bild 2. Fließdiagramm zur Ermittlung der krautlosen Sohlrauigkeit in der Winterperiode (dünne Pfeile) sowie der von den Makrophyten beeinflussten Gerinnerrauhigkeit im Sommer (fette Pfeile).

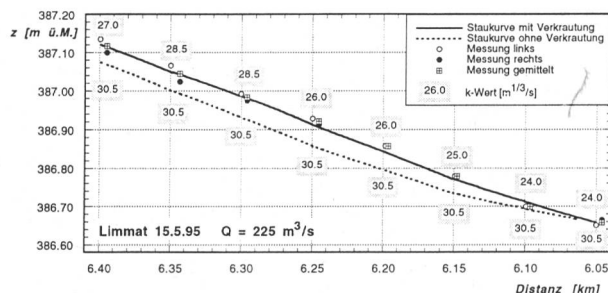


Bild 3. Die berechneten Staukurven für die krautlose (punktuelle Linie) und die an die Verkräutung angepasste Sohlenrauigkeit (ausgezogene Linie) im Vergleich zum vermessenen Wasserspiegelverlauf vom 15. Mai 1995 an der Limmat. Die berechnete Staukurve mit berücksichtigter Verkräutung stimmt gut mit dem vermessenen Wasserspiegel überein und beträgt maximal 1,5 cm. Die Verkräutungsbedingte Anhebung des Wasserspiegels beträgt bei dieser Situation bis zu 7 cm.

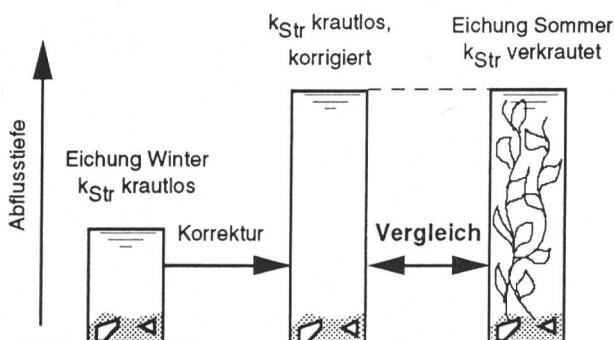


Bild 4. Die geeichten  $k_{Str}$ -Werte für den krautlosen Winterzustand werden mittels Korrekturfunktion (Bild 5) an die entsprechenden Abflusstiefen der erfassten Sommerabflussverhältnisse angepasst. Der Vergleich zwischen diesen korrigierten  $k_{Str}$ -Werten und den geeichten Werten für die Sommerverhältnisse mit Verkräutung ergibt die verkräutungsbedingte Änderung der  $k_{Str}$ -Werte ( $\Delta k_{Str}$ ).

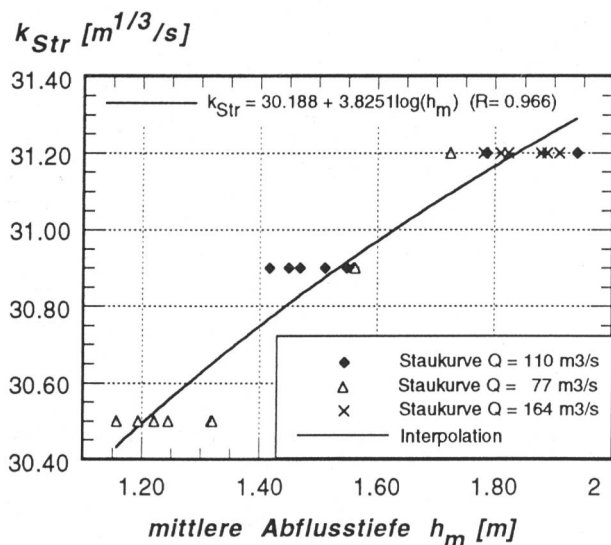


Bild 5.  $k_{Str}$ -Wert der Gerinnesohle ohne Verkräutung (krautlose Gerinnersohlenheit) in Abhängigkeit der mittleren Abflusstiefe. Die einzelnen Punkte für einen Abfluss repräsentieren verschiedene Querprofile.

$k_{Str}$ -Werten konnte generell eine gute Übereinstimmung zwischen den Messungen und Berechnungen erzielt werden, in diesem Beispiel mit Abweichungen von maximal 1,5 cm.

Weiter ist in Bild 3 der Wasserspiegelverlauf für die gleiche Abflussmenge, jedoch für den Zustand ohne Verkräu-

tung (krautlose Sohlenrauigkeit von  $30,5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ), eingetragen. Die Abweichung zwischen dieser Staukurve und dem am 15. Mai 1995 gemessenen Wasserspiegel ist beträchtlich und beträgt bis zu 7 cm.

#### 4.2 Änderung von $k_{Str}$ aufgrund der Abflusstiefe

In einem Fließgewässer wird der Einfluss der Sohlenrauigkeit um so kleiner, je grösser die Abflusstiefe ist. Demzufolge wird  $k_{Str}$  zur Beschreibung der Sohlenrauigkeit mit zunehmender Abflusstiefe grösser. Da die Gerinnersohlenheit für den krautlosen Winterzustand bei kleineren Abflüssen – und somit auch kleineren Abflusstiefen – ermittelt wurde als im Sommerzustand, sind die  $k_{Str}$ -Werte für die verschiedenen Zustände nicht direkt vergleichbar. Die  $k_{Str}$ -Werte für die krautlose Sohlenrauigkeit wurden deshalb mittels einer Korrekturfunktion an die grösseren Sommerabflusstiefen angepasst (Bild 4).

Die Korrekturfunktion basiert auf verfeinerten Staukurvenberechnungen für die durchgeführten Wintervermessungen, bei denen die  $k_{Str}$ -Werte der krautlosen Sohlenrauigkeit in Abhängigkeit der Abflusstiefen weiter optimiert wurden. Bild 5 zeigt die optimierten  $k_{Str}$ -Werte, welche für die unterschiedlichen Abflusstiefen verwendet wurden, sowie die daraus abgeleitete Korrekturfunktion für die Versuchsstrecke an der Limmat.

#### 4.3 Änderung von $k_{Str}$ aufgrund der Verkräutung

Die geeichten  $k_{Str}$ -Werte für die beiden kartierten Verkräutungsstände im Frühsommer und Sommer können nun mit den auf die entsprechenden Abflusstiefen korrigierten  $k_{Str}$ -Werten der krautlosen Gerinnersohlenheit verglichen werden. Die Differenz ( $\Delta k_{Str}$ ) ist dabei die gesuchte Änderung der Gerinnersohlenheit aufgrund der Wasserpflanzen. Werden diese Differenzen biologischen Grössen gegenübergestellt, welche den Grad der Gerinneverkräutung beschreiben, kann der direkte Zusammenhang zwischen dem Verkräutungsgrad und der Änderung von  $k_{Str}$  abgeleitet werden. Als Mass für den Verkräutungsgrad wurde das Verhältnis zwischen Durchflussfläche (AQ) und Verkräutungs-Stirnfläche (AB) gewählt. Die Durchflussfläche ist als benetzte Fläche eines Querprofils definiert, die Verkräutungs-Stirnfläche als die in einem Querprofil senkrecht zur Strömungsrichtung stehende Pflanzenfläche unter Berücksichtigung der Bewuchsdichte (Abegg und Wächter 1996). In Bild 6 ist für die durchgeführten Messungen  $\Delta k_{Str}$  dem Verhältnis (AQ/AB) gegenübergestellt.

Die Veränderung von  $k_{Str}$  aufgrund des Wasserpflanzenbewuchses kann demzufolge mit folgender Formel berechnet werden:

$$\Delta k_{Str} = 10,464 - 2,149 \ln(AQ/AB)$$

mit

AQ = Durchflussfläche senkrecht zur Strömungsrichtung  
AB = Verkräutungs-Stirnfläche senkrecht zur Strömungsrichtung

Ist der Quotient AQ/AB grösser als 130 oder – umgekehrt ausgedrückt – beträgt die Verkräutungs-Stirnfläche weniger als 0,8 % der Durchflussfläche, so wird  $\Delta k_{Str}$  negativ. Bei diesem oder kleinerem Verkräutungsgrad bleibt  $k_{Str}$  unbeeinflusst. Der Gültigkeitsbereich der Formel wird nach oben durch den grössten beobachteten Verkräutungsgrad mit AQ/AB = 5 (Limmat, Profil 4, 29. Juni 1995) begrenzt. Damit lässt sich der  $k_{Str}$ -Wert unter Berücksichtigung der Gerinneverkräutung wie folgt angeben:

$$\begin{aligned} k_{Str} &= k_{Str} && \text{für } AQ/AB > 130 \\ k_{Str} &= k_{Str} - \Delta k_{Str} \\ &= k_{Str} - 10,464 + 2,149 \ln(AQ/AB) && \text{für } 5 > AQ/AB > 130 \end{aligned}$$

## 5. Rechenbeispiel

Anhand eines Beispiels soll gezeigt werden, in welchem Mass sich  $\Delta k_{Str}$  auf die Wasserspiegellage auswirken kann. Die Berechnungsannahmen entsprechen etwa den Verhältnissen im Hauptgerinne der Limmat bei Dietikon.

Sohlenbreite	60 m
Böschungsneigung	1:1
Längsgefälle	0,15 ‰
Uferrauhigkeit	28 m <sup>1/3</sup> /s (Blockwurf)
Krautlose Sohlenrauheit	30,5 m <sup>1/3</sup> /s
AQ/AB	15

Mit den Formeln aus Abschnitt 4 ergibt sich:

$$\Delta k_{Str} = 4,6 \text{ m}^{1/3}/\text{s} \text{ und } k_{Worr} = 25,9 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

Werden für die zwei Gerinnerrauhigkeiten die Abflusstiefen bei verschiedenen Abflüssen anhand des Fliessgesetzes von Strickler berechnet, zeigt sich, dass die Verkräutung einen erheblichen Einfluss auf die Abflusstiefe ausübt (Bild 7). Bei dem im Rahmen dieser Untersuchung grössten

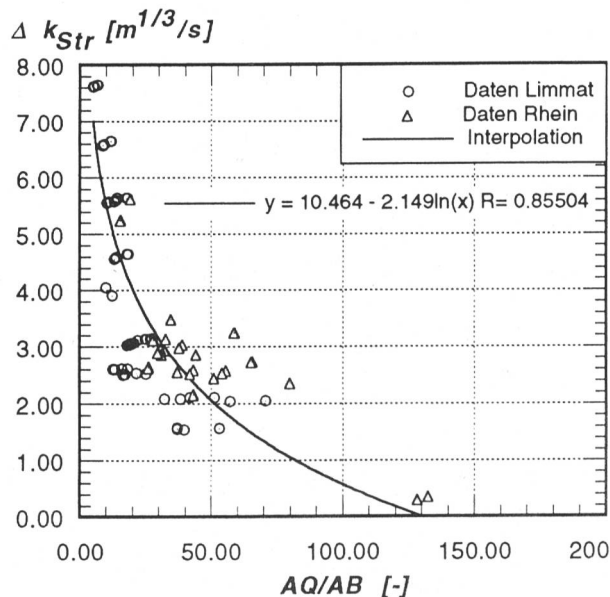


Bild 6.  $\Delta k_{Str}$  in Abhängigkeit vom Verkräutungsgrad, ausgedrückt durch das Verhältnis von Durchflussfläche zu Verkräutungs-Stirnfläche (AQ/AB).

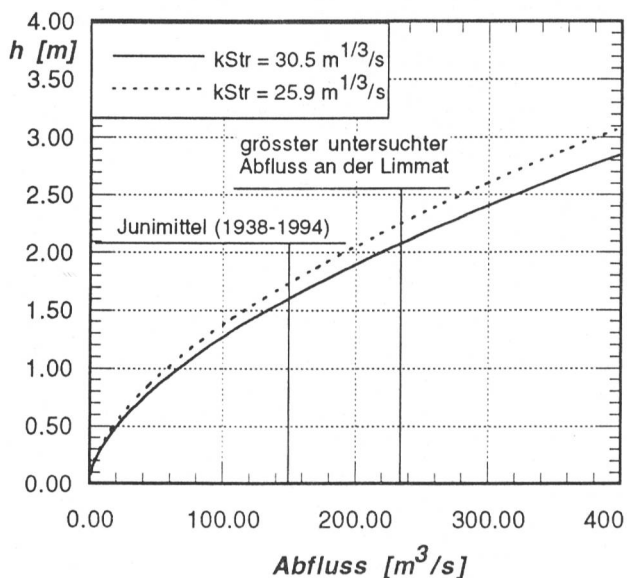


Bild 7. Auswirkung einer verkräutungsbedingten Abminderung von  $k_{Str}$  um  $\Delta k_{Str} = 4,5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  ( $AQ/AB = 15$ , resp. 7% der Durchflussfläche ist verkräutet) auf die Abflusstiefe.

registrierten Abfluss in der Limmat verursacht dieser Verkräutungsgrad eine Anhebung des Wasserspiegels von rund 20 cm. Bei einem Abfluss von 150 m³/s, was dem langjährigen Juni-Monatsmittel am Pegel Limmat Unterhard der Landeshydrologie entspricht, beträgt die Hebung immer noch 12 cm.

## 6. Anwendung bei Flusskraftwerken

Die vorgestellte Methode erlaubt es, die verkräutungsbedingte Änderung der Sohlenrauheit,  $\Delta k_{Str}$ , zu quantifizieren. Anhand von hydraulischen Berechnungen kann der Einfluss von  $\Delta k_{Str}$  auf die Abflusstiefe – und damit auf die Wasserspiegellage – bestimmt werden.

Treten Makrophytenfelder im Bereich von Flusskraftwerken auf, können demnach die Änderung der Wasserspiegellage berechnet und die resultierende Produktionseinbusse abgeschätzt werden. Dies wiederum dient als Grundlage für die optimale Planung von Mäheinsätzen. Einerseits kann derjenige Verkräutungsgrad bestimmt werden, ab welchem die Produktionsverluste die finanziellen Aufwendungen einer Mähaktion übersteigen und somit einen Einsatz aus ökonomischen Überlegungen rechtfertigen. Andererseits lassen sich die Flussabschnitte, in welchen die Makrophytenfelder die Wasserspiegellage im unmittelbaren Kraftwerkbereich beeinflussen, räumlich abgrenzen. Damit lässt sich der Mäherimeter optimal festlegen und der Aufwand auch aus dieser Sicht minimieren.

### Literaturverzeichnis

- Abegg, J., und Wächter, K. (1996): Bestimmung der Energieverluste bei Flusskraftwerken durch Makrophytenbestände. Verbandschrift 55 des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes, Baden, 52 Seiten und Anhang.
- DVWK (1990): Hydraulische Methoden zur Erfassung von Rauheiten. DVWK-Schriften Heft 92, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, 303 Seiten.
- Hagmann, A. (1976): Erschwerte Bestimmung der Abflussmengen am Hochrhein zufolge Verkräutung. «wasser, energie, luft» 68 (10), 241–245.
- Knecht, A. (1985): Ökologische und experimentelle Untersuchungen zur Massenentwicklung von Ranunculus fluitans LAM. im Rhein. Dissertation Universität Zürich, Zürich, 114 Seiten.
- Kranich, L. (1976): Die Bekämpfung des Flutenden Hahnenfusses. «wasser, energie, luft» 68 (10), 239–241.
- Kunz, E. (1976): Die Verkräutung des Hoch- und Oberrheins. «wasser, energie, luft» 68 (10), 224–229.
- Limnex (1995): Auswertungsergebnisse der zweiten Makrophyten-Grobkartierungen 1990–1992 in Rhein, Aare und Reuss sowie Vergleich mit den Ergebnissen des ersten Inventars 1984–1986. Verband Aare-Rheinwerke, Baden.
- Strickler, A. (1923): Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauheitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen. Mitteilung des Amtes für Wasserwirtschaft Nr. 16, Bern.
- Thomas, E. A. (1975): Kampf dem zunehmenden Wasserpflanzenbewuchs in unseren Gewässern. Wasser- und Energiewirtschaft 1/2, 1–8.
- Wächter, K. (1989): Auswertung der Makrophyten-Grobkartierung in Rhein, Aare und Reuss zwischen 1984 und 1986. Verband Aare-Rheinwerke, Baden.

Die praxisorientierte Forschungsarbeit wurde durch den Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL) finanziert. Die Originalarbeit ist als Verbandschrift 55 des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes (SWV) unter dem Titel «Flusskraftwerke und Wasserpflanzen, Bestimmung der Energieverluste bei Flusskraftwerken durch Makrophytenbestände» erschienen (vgl. Abegg und Wächter 1996). Ein Teil der Druckkosten der SWV-Publikation ist verdankenswerterweise durch den Verband Aare-Rheinwerke übernommen worden.

### Adressen der Verfasser:

- Johannes Abegg, dipl. Ing. ETH, Schälchli & Abegg, Reinhardstrasse 14, CH-8008 Zürich.
- Kurt Wächter, dipl. phil. II, Limnologie OeVS, Limnex AG, Schaffhauserstrasse 343, CH-8050 Zürich.