

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 (Makrophyten¹) 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 Mittelrandflüsse teilweise erheblich verkratzt 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 Schiffahrt, 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 Gerinnerauigkeit (Hagmann 1976). Um den Einfluss auf das Abflussverhalten quantifizieren zu können, wurde versucht, eine Abhängigkeit zwischen Gerinnerauigkeit (ausgedrückt durch den Stricklerbeiwert k_{St} , Strickler 1923) und Verkratungsgrad herzuleiten. Anhand der verkratungsbedingten Änderung von k_{St} kann die Erhöhung der Wasserspiegellage berechnet und so auf die Produktionseinbusse bei Flusskraftwerken infolge der reduzierten nutzbaren Fallhöhe geschlossen werden.

2. Methodik

Zur Bestimmung des Einflusses der Verkratung 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 Wasserspiegellängenprofile in einer kürzeren Periode um den Kartierungszeitpunkt vermessen (Bild 1). Mit diesem Vorgehen konnten jeweils für einen konstanten

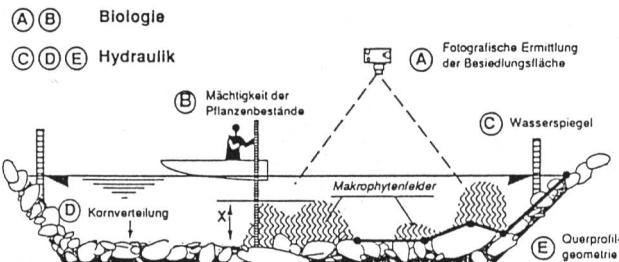


Bild 1. Feldarbeiten zur Erfassung der biologischen und hydraulischen Randbedingungen in den beiden Versuchsstrecken.

¹ 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.

Verkratungsgrad die hydraulischen Verhältnisse bei unterschiedlichen Abflüssen erfasst werden.

Im nächsten Arbeitsschritt wurden die gemessenen Wasserspiegellängenprofile anhand von Staukurvenberechnungen nachgebildet. Dabei wurden die k_{St} -Werte der Gerinnensohle solange korrigiert, bis die berechneten Wasserspiegelkoten 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 Gerinnerauigkeit bei vernachlässigbar kleinem sowie der Rauigkeit im Sommer bei gössem Bewuchs. Der Vergleich dieser Werte liefert – unter Berücksichtigung des Einflusses der Abflusstiefe – die gesuchte Änderung der Gerinnerauigkeit 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 Verkratungsgrade in den beiden Versuchsstrecken.

Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen fiel die Wahl auf einen rund 1 km langen Abschnitt am Hochrhein bei Diessendorf (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

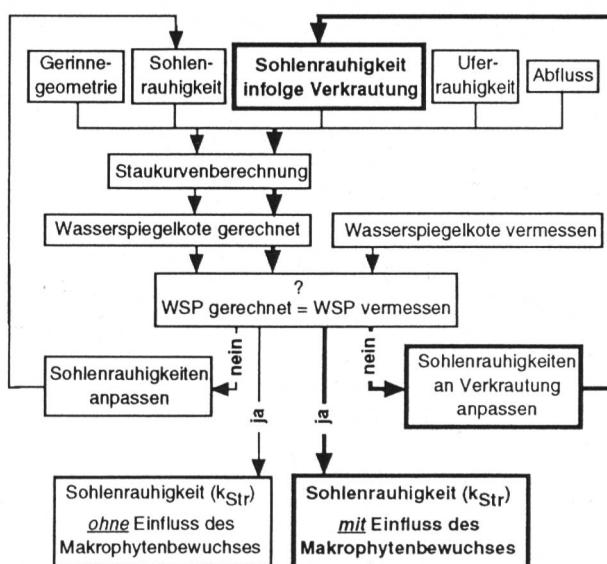


Bild 2. Fliessdiagramm zur Ermittlung der krautlosen Sohlrauhigkeit in der Winterperiode (dünnen Pfeile) sowie der von den Makrophyten beeinflussten Gerinnerauigkeit im Sommer (fette Pfeile).

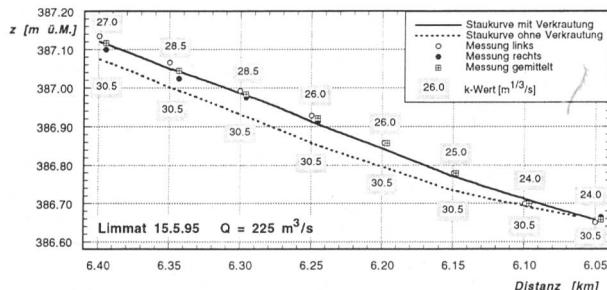


Bild 3. Die berechneten Staukurven für die krautlose (punktierter Linie) und die an die Verkrautung angepasste Sohlenrauhigkeit (ausgezogene Linie) im Vergleich zum vermessenen Wasserspiegelverlauf vom 15. Mai 1995 an der Limmat. Die berechnete Staukurve mit berücksichtigter Verkrautung stimmt gut mit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

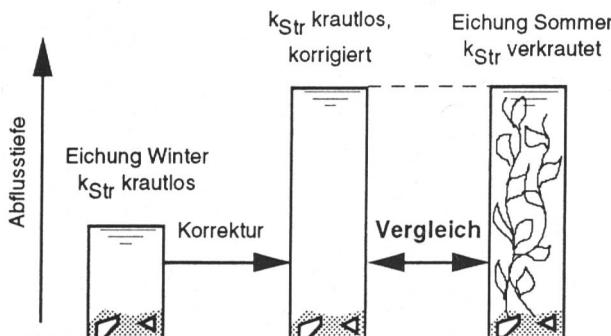


Bild 4. Die geeichten k_{Str} -Werte für den krautlosen Winterzustand werden mittels Korrekturfunktion (Bild 5) an die entsprechenden Abflusstiefen der erfassten Sommerabflussverhältnisse angepasst. Der Vergleich zwischen diesen korrigierten k_{Str} -Werten und den geeichten Werten für die Sommerverhältnisse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

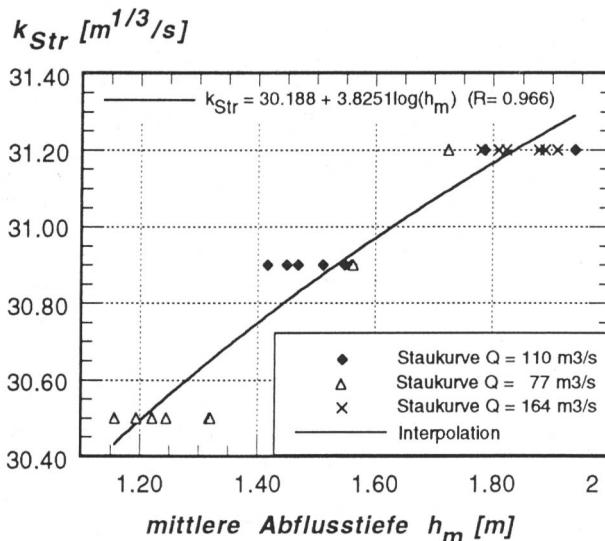


Bild 5. k_{Str} -Wert der Gerinnesohle ohne Verkrautung (krautlose Gerinnerauhigkeit) in Abhängigkeit der mittleren Abflusstiefe. Die einzelnen Punkte für einen Abfluss repräsentieren verschiedene Querprofile.

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 Verkrau-

tung (krautlose Sohlenrauhigkeit 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 Sohlenrauhigkeit um so kleiner, je grösser die Abflusstiefe ist. Demzufolge wird k_{Str} zur Beschreibung der Sohlenrauhigkeit mit zunehmender Abflusstiefe grösser. Da die Gerinnerauhigkeit 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 Sohlenrauhigkeit wurden deshalb mittels einer Korrekturfunktion an die grösseren Sommerabflusstiefen angepasst (Bild 4).

Die Korrekturfunktion basiert auf verfeinerten Staukurvenberechnungen für die durchgeföhrten Wintervermessungen, bei denen die k_{Str} -Werte der krautlosen Sohlenrauhigkeit 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 Verkrautung

Die geeichten k_{Str} -Werte für die beiden kartierten Verkrautungsstände im Frühsommer und Sommer können nun mit den auf die entsprechenden Abflusstiefen korrigierten k_{Str} -Werten der krautlosen Gerinnerauhigkeit verglichen werden. Die Differenz (Δk_{Str}) ist dabei die gesuchte Änderung der Gerinnerauhigkeit aufgrund der Wasserpflanzen. Werden diese Differenzen biologischen Grössen gegenübergestellt, welche den Grad der Gerinnerverkrautung beschreiben, kann der direkte Zusammenhang zwischen dem Verkrautungsgrad und der Änderung von k_{Str} abgeleitet werden. Als Mass für den Verkrautungsgrad wurde das Verhältnis zwischen Durchflussfläche (AQ) und Verkrautungs-Stirnfläche (AB) gewählt. Die Durchflussfläche ist als benetzte Fläche eines Querprofils definiert, die Verkrautungs-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 durchgeföhrten Messungen Δk_{Str} dem Verhältnis (AQ/AB) gegenübergestellt.

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

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

mit

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

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

$$k_{\text{korr}} = k_{\text{Str}} \quad \text{für } AQ/AB > 130$$

$$k_{\text{korr}} = k_{\text{Str}} - \Delta k_{\text{Str}}$$

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

5. Rechenbeispiel

Anhand eines Beispiels soll gezeigt werden, in welchem Mass sich Δk_{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 ^{1/3} /s (Blockwurf)
Krautlose Sohlenrauhigkeit	30,5 m ^{1/3} /s
AQ/AB	15
Mit den Formeln aus Abschnitt 4 ergibt sich:	
$\Delta k_{Str} = 4,6 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ und $k_{corr} = 25,9 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$	

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

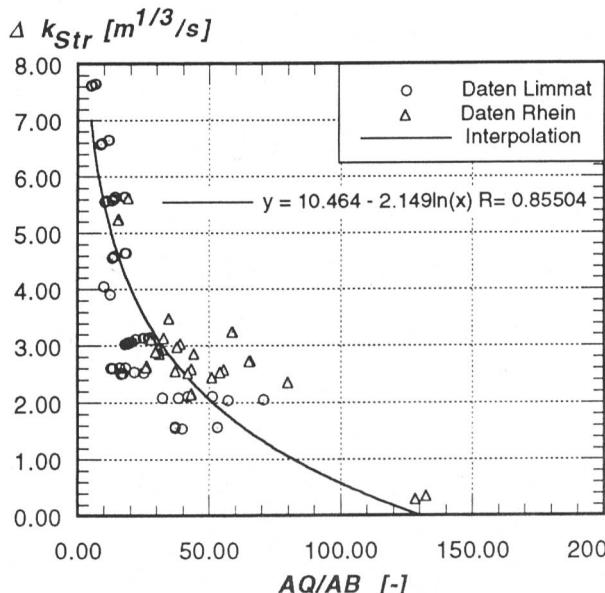


Bild 6. Δk_{Str} in Abhängigkeit vom Verkrautungsgrad, ausgedrückt durch das Verhältnis von Durchflussfläche zu Verkrautungs-Stirnfläche (AQ/AB).

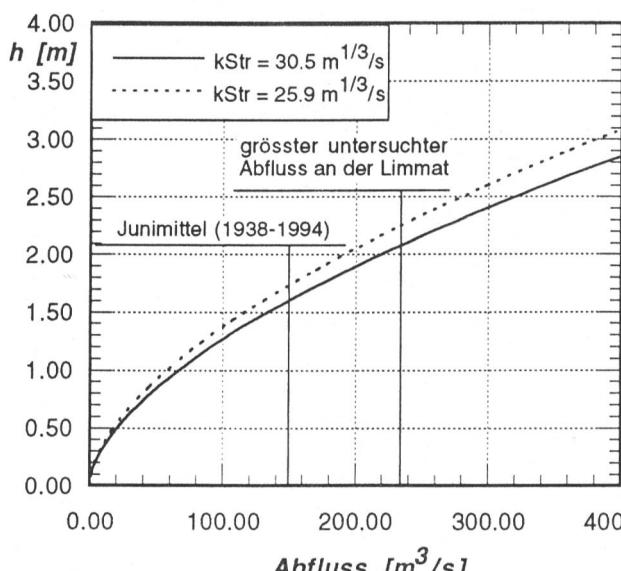


Bild 7. Auswirkung einer verkrautungsbedingten Abminderung von k_{Str} um $\Delta k_{Str} = 4,5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ (AQ/AB = 15, resp. 7% der Durchflussfläche ist verkrautet) auf die Abflusstiefe.

registrierten Abfluss in der Limmat verursacht dieser Verkrautungsgrad 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 verkrautungsbedingte Änderung der Sohlenrauhigkeit, Δk_{Str} , zu quantifizieren. Anhand von hydraulischen Berechnungen kann der Einfluss von Δk_{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 Verkrautungsgrad 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 Wasserspiegelkote im unmittelbaren Kraftwerkbereich beeinflussen, räumlich abgrenzen. Damit lässt sich der Mähperimeter 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): Erschwerete Bestimmung der Abflussmengen am Hochrhein zufolge Verkrautung. «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 Verkrautung 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 Rauhigkeitszahlen 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, Schälichli & Abegg, Reinhardstrasse 14, CH-8008 Zürich.
- Kurt Wächter, dipl. phil. II, Limnologie OeVS, Limnex AG, Schaffhauserstrasse 343, CH-8050 Zürich.