

# Die Veränderung des Geschiebehaushalts der Aare von Aarberg bis zum Rhein

Autor(en): **Schälchli, Ueli**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **82 (1990)**

Heft 7-8

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-939815>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Die Veränderung des Geschiebehaushalts der Aare von Aarberg bis zum Rhein

Ueli Schälchli

## Zusammenfassung

Mit dem Beginn der neueren wasserbaulichen Veränderungen im Einzugsgebiet der Aare ist der Geschiebehaushalt des grössten mittelländischen Flusses in der Schweiz massgebend verändert worden. Die Geschiebezufuhr beschränkt sich heute auf wenige Zuflüsse mit stark reduzierten Frachten, auf den Weitertransport von Kiesbänken und die Erosion unbefestigter Ufer in der Aare selbst. Die jährliche Geschiebefracht beträgt heute noch einen Bruchteil derjenigen vor 120 Jahren. Drei kürzere Streckenabschnitte, die bis heute vom Kraftwerkbau nicht direkt betroffen sind, werden durch die Folge dieses Geschiebedefizits besonders beeinflusst. Eine langsam fortschreitende Ausräumung des feineren Geschiebes, die Vergröberung und Verdichtung der Sohle, eine leichte Eintiefung des Flussbetts und die Erosion von Inseln sind die Folge. Durch die künstliche Geschiebezufuhr, die Aufhebung von Geschiebesammlern oder das Ermöglichen von kontrollierten örtlichen Ufererosionen könnte diese Entwicklung gestoppt und drei einzigartige Flussabschnitte könnten in ihrer Vielfalt erhalten werden.

## Einleitung

Es sind erst 112 Jahre her, dass der in dreijähriger Arbeit erstellte Hagneckkanal, der die Aare von Aarberg in den Bielersee leitet, eröffnet wurde. Beginnend mit diesem Werk – Bestandteil der I. Juragewässerkorrektur –, setzte eine grundlegende Veränderung des Aarelaufes ein, die bis heute noch nicht abgeschlossen ist.

Die Aare zeigt sich heute als weitgehend gezähmter, oft eingegengter und gestauter Flusslauf. Abgesehen von ein paar

kürzeren Strecken, fliesst ihr Wasser ruhig und gleichmässig dahin, und selbst ihre benetzte Breite schwankt zwischen Niedrig- und Hochwasser wegen der steilen Böschungen nur geringfügig.

Dieser Beitrag stellt den Versuch dar, den Charakter der Aare vor den grösseren fluss- und wasserbaulichen Eingriffen zu beschreiben, die Veränderungen im Einzugsgebiet und die Auswirkungen auf die Aare aufzuzeigen und zukünftig sich weiterentwickelnde Prozesse zu erkennen. Besonderes Gewicht wird dabei auf den Geschiebehaushalt und die morphologischen Veränderungen gelegt. Am Schluss werden Massnahmen diskutiert, deren Ziel es ist, dass sich die Aare auf bestimmten Strecken wieder in Richtung eines naturnahen Gewässers entwickeln kann. Nicht erwähnt werden die Ursachen für die verschiedenen Flusskorrekturen und die wirtschaftliche Bedeutung der Wasserkraftbauten, über die schon an anderen Orten ausführlich berichtet wurde.

## Das Wesen der natürlichen Aare

Vor der Umleitung in den Bielersee durchfloss die Aare das Berner Seeland entlang der rechten Talebene und führte an Lyss, Busswil und Dotzigen vorbei. Wirft man einen Blick auf die Karte aus dem Jahre 1842 (Bild 1), so fällt sofort der verzweigte Flusslauf auf. Verzweigte Gerinne deuten in der Regel auf eine bedeutende Geschiebezufuhr hin. Noch vor 300 Jahren wurde die Aare mit Geschiebe aus den Einzugsgebieten der Kander und der Saane versorgt. Seit der Korrektur im Jahre 1714 wird die Kander bei Einigen direkt in den Thunersee geleitet [8]. Zum Zeitpunkt der Kartenaufnahme (1842) gelangte aber immer noch das Geschiebe aus dem Einzugsgebiet der Saane und – von geringerer Bedeutung – das Geschiebe der Zulg in die Aare, so dass die Strecke zwischen Aarberg und Meienried hinsichtlich Geschiebetrieb als natürlich bezeichnet werden darf. An dieser Stelle sei auch darauf hingewiesen, dass das Geschiebe der Saane seit dem Aufstau des Lac de la Gruyere nicht mehr in die Aare – und damit in den Bielersee – gelangt. Flussauf-

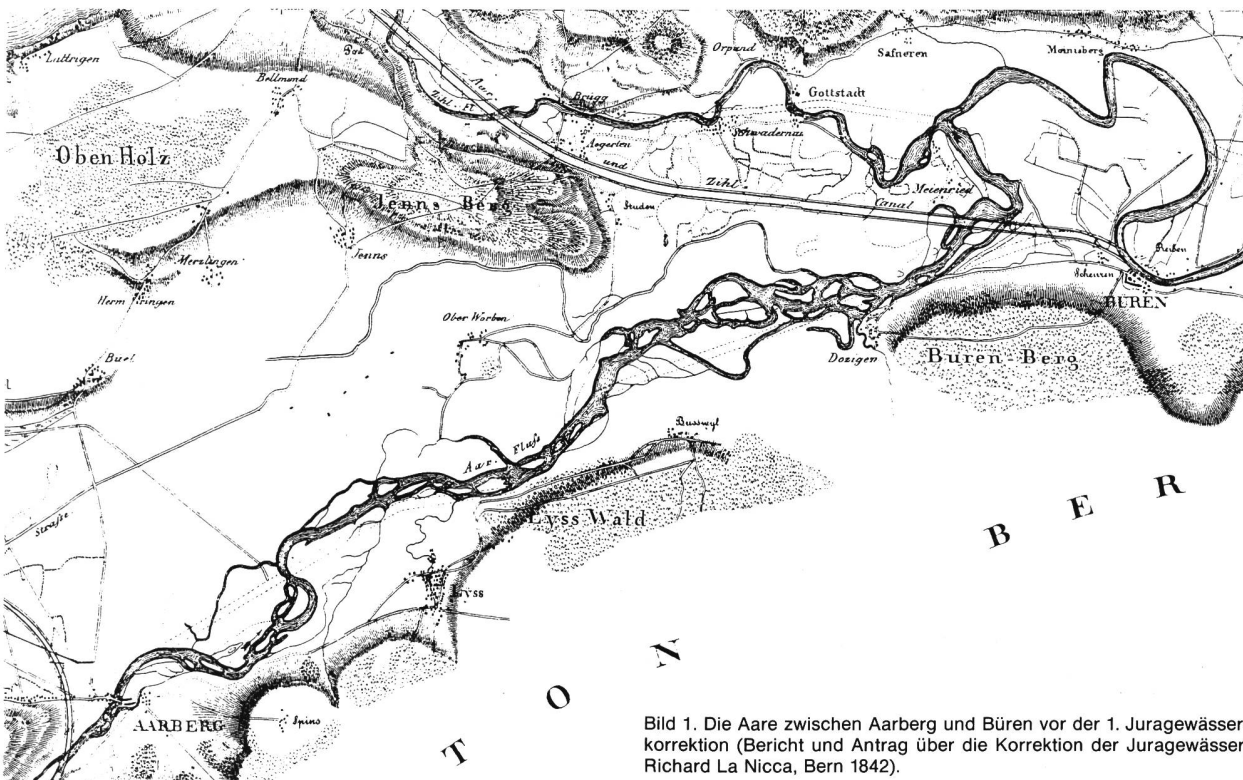


Bild 1. Die Aare zwischen Aarberg und Büren vor der 1. Juragewässerkorrektur (Bericht und Antrag über die Korrektur der Juragewässer, Richard La Nicca, Bern 1842).

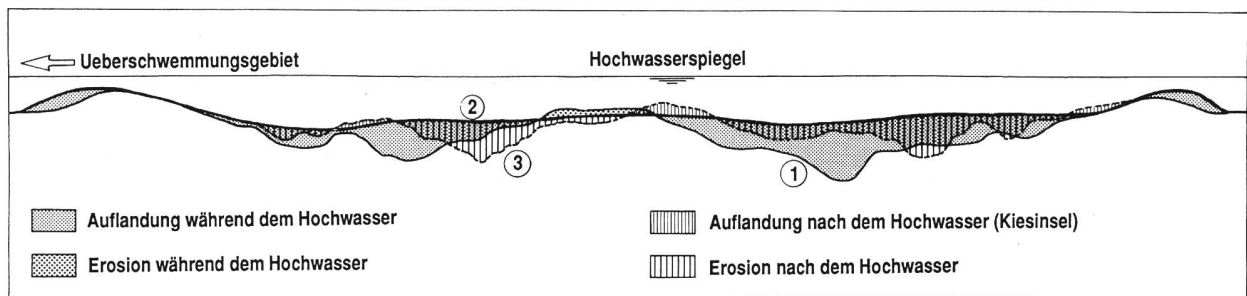


Bild 2. Beispiel der Querprofile eines verzweigten Flusslaufs vor (1), während (2) und nach (3) einem Hochwasser. Stark überhöht gezeichnet.

wärts von Aarberg hatte die Aare ein Längsgefälle von rund 2,7‰, das sich flussabwärts im Seeland auf 1,3‰ reduzierte. Die Halbierung des Gefälles bewirkte eine massgebende Verminderung der Geschiebetransportkapazität (bei den gebräuchlichen Geschiebetriebformeln wird die Abhängigkeit vom Gefälle durch einen Exponenten um 1,5 ausgedrückt). Daher besass die Aare beim Gefälleknick von Aarberg einen Geschiebeüberschuss, der bei Hochwasser zu einer Auebnung und einer Auflandung der Sohle sowie zur Ablagerung von Geschiebe im Bereich der Ufer führte (Bild 2). Dabei ist zu beachten, dass sich die Breite des Abflusses bei Hochwasser wegen der Überflutung von Kiesbänken und flachen Uferbereichen vervielfachen konnte und die Schleppkraft des Abflusses dadurch wenig zunahm. Die Ablagerung von Geschiebe im Bereich der Ufer konnte zu einer Erhöhung der natürlichen Uferwälle und damit zu einer sukzessiven Anhebung des Gerinnes über das angrenzende Gelände führen. Die Auflandung des Gerinnes erhöhte die Wahrscheinlichkeit von grösseren Laufverlegungen. Beim Abklingen des Hochwassers konzentrierte sich der Abfluss auf einen begrenzten Bereich des Gerinnes, das abgelagerte Material wurde teilweise weitertransportiert, und es bildeten sich neue Haupt- und Nebengerinne. Die Aare beanspruchte eine Breite bis zu 1 km, und das angrenzende landwirtschaftlich genutzte Seeland kann als Überschwemmungsgebiet bezeichnet werden. Die Flusslandschaft der Aare zwischen Aarberg und Meienried war geprägt durch sich häufig verändernde Flussarme, Sandbänke, Kiesinseln und bewachsene Inseln. Die dazugehörige Vegetation war der Auenwald. Vom ökologischen Standpunkt kann dieser Streckenabschnitt der Aare zum damaligen Zeitpunkt als eine Naturlandschaft mit einer aussergewöhnlichen Dynamik bezeichnet werden.

Zwischen Büren und Solothurn strömt die Aare in grossen Mäanderschlaufen durch die Sedimente eines nacheiszeitlich aufgefüllten Jurarandsees, der sich nach neueren Erkenntnissen auf die Ebene zwischen Grenchen und Solothurn beschränkte (Bild 3). Die Flusssohle besteht auf dieser Strecke mehrheitlich aus Sanden, woraus sich schliesen lässt, dass alles Grobgeschiebe aus dem oberen Einzugsgebiet flussaufwärts von Büren abgelagert wurde; die Aare wies also bereits im natürlichen Zustand ein unterbrochenes Geschieberegime auf. Die Auswirkungen der I. Juragewässerkorrektur beschränkten sich demnach flussabwärts von Büren auf das Abflussregime und die Schwebstofffracht. Früher migrierten die Mäander bei Hochwasser langsam flussabwärts, wodurch Schlaufen durchbrochen werden konnten und sich Altarme bildeten, die mit der Zeit wieder verlandeten. Auf Bild 4 ist ein Abschnitt der Aare mit Grundwasseraufstössen und zwei Altarmen während des Hochwassers vom 26. November 1944, mit einem Maximalabfluss von 700 m<sup>3</sup>/s, ersichtlich. Die früher häufig auftretenden Überschwemmungen wurden durch das Emmedelta und eine Molasseschwelle, welche die Aare flussaufwärts

weit zurückstauen konnten, zusätzlich verstärkt. Weiter flussabwärts strömt die Aare über eine Strecke von 15 bis 20 km in Talmäandern von Wangen über Wynau/Wolfwil und Murgenthal nach Aarburg. Sie hat sich hier in die nacheiszeitlich abgelagerten Schotterebenen eingegraben und diese teilweise bis auf die Molasse erodiert. Die daraus entstandenen älteren und jüngeren Terrassen sind im Bereich von Aarwangen/Wynau gut sichtbar. Die Veränderung des Flusslaufes, die sich hier vor allem durch Ufererosion und eine leichte Tiefenerosion ausdrückt, erfolgte, verglichen mit der Strecke Aarberg–Meienried, sehr langsam. Zwischen Olten und Brugg strömte die Aare in weiten Mäanderschlaufen durch die nacheiszeitlich abgelagerten Schotter. Die Aare beanspruchte im breiten Tal bedeutend mehr Platz als heute. Auf ihrem gesamten Lauf bildeten sich immer wieder Kiesbänke und Inseln, die ein Anzeichen für die Tendenz zur Bildung eines verzweigten Flusses darstellen. Diese Tendenz verstärkte sich zwischen Wildeggen und Brugg, wo sich wegen des abnehmenden Gefälles (ähnlich wie bei Aarberg) bei gleichbleibender Geschiebefracht das Gerinne stärker aufteilte (Bilder 3 und 5). Kiesbänke und Inseln mit Auenwaldvegetation, wie sie heute in der Restwasserstrecke unterhalb des Wehrs des Kraftwerks Wildeggen-Brugg in Restbeständen noch vorhanden sind, prägten die Landschaft bis nach Altenburg. Bei Brugg strömte die Aare (wie auch heute noch) durch ihre in den Fels erodierte Schlucht, deren Sohle für das Längsprofil flussaufwärts als Fixpunkt diente. Unmittelbar flussabwärts, im Mündungsbereich von Aare, Reuss und Limmat, wies die Flusslandschaft einen ähnlichen Charakter auf: Das Gebiet des Aargauer Wasserschlosses zeigte im 17. Jahrhundert mehrere grosse bewachsene Inseln, die den gesamten Windischer Schachen umfassten (Bild 5). Der Flussraum beanspruchte eine Breite bis zu 500 m. Die zwei Streckenabschnitte Wildeggen–Altenburg und Brugg–Lauffohr waren Umlagerungsstrecken für das Geschiebe (als Umlagerungsstrecken werden Flussabschnitte bezeichnet, wo bei Hochwasser ein Teil der Geschiebefracht abgelagert und später, bei kleineren geschiebeführenden Abflüssen, dosiert weitertransportiert wird).

#### Das veränderte Geschiebeaufkommen der Aare

Verschiedene Massnahmen im Einzugsgebiet der Aare haben nach der I. Juragewässerkorrektur dazu geführt, dass der Geschiebetransport der Aare flussabwärts der Emmemündung bis heute stetig abgenommen hat. Diese Massnahmen beziehen sich einerseits auf die Zuflüsse, und andererseits betreffen sie Veränderungen in der Aare selbst:

Massnahmen in den Zuflüssen:

- Sperrerbau in den steilen Seitenbächen
- Querbauten (Schwellen)
- Längsbauwerke, Uferschutz
- Geschiebesammler
- Kiesentnahmen



Bild 3. Die Aare zwischen Büren und der Limmatmündung um 1845. Dufour-Karte, Massstab 1:100 000.

Massnahmen in der Aare:

- Kraftwerksbau
- Baggerungen
- Uferschutz

Die Summe der Massnahmen führte dazu, dass der Geschiebeeintrag in die Aare heute wenige 1000 m<sup>3</sup> jährlich kaum übersteigt (gegenüber mehr als 20000 m<sup>3</sup> im natürlichen Zustand).



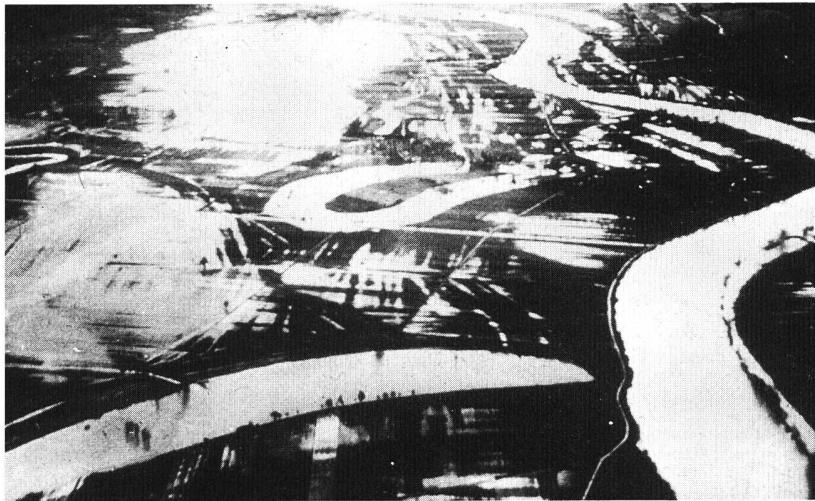


Bild 4. Die Aare im Bereich von Grenchen während des Hochwassers vom November 1944.

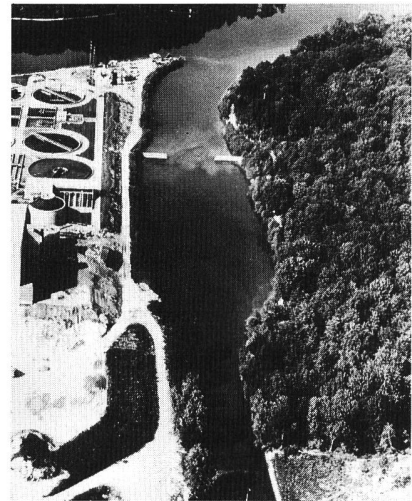


Bild 6. Der Geschiebesammler an der Emme vor der Mündung in den Stauraum des Kraftwerks Flumenthal.

Die folgende Zusammenstellung gibt einen Überblick über den aktuellen Geschiebeeintrag der grösseren Zuflüsse in die Aare. In Bild 7 sind alle erwähnten Fliessgewässer und die dazugehörigen Teileinzugsgebiete dargestellt.

#### Emme

Die Geschiebefracht der Emme, die vor allem aus den Nagelfluhformationen um den Napf, der Blasenflue und dem Rämigummen stammt, wird abgesehen vom unterwegs herausgebaggerten Anteil im Geschiebesammler an der Emmemündung abgelagert. Das Fassungsvermögen dieses Geschiebesammlers beträgt 35000 bis 40000 m<sup>3</sup> und umfasst damit gemäss [4] rund das Fünffache einer durchschnittlichen jährlichen Geschiebefracht (7500 m<sup>3</sup>, Durchschnittswert 1969–1982). Auf Bild 6 sind der Zusammenflussbereich von Aare und Emme sowie der Geschiebesammler abgebildet.

#### Murg (Langeten, Rot)

Die Murg ist der bedeutendste Aarezufluss im Oberaargau. Das Einzugsgebiet der Langeten reicht bis zu den Ausläufern des Napfs. Die Gerinnekapazität der Langeten ist in

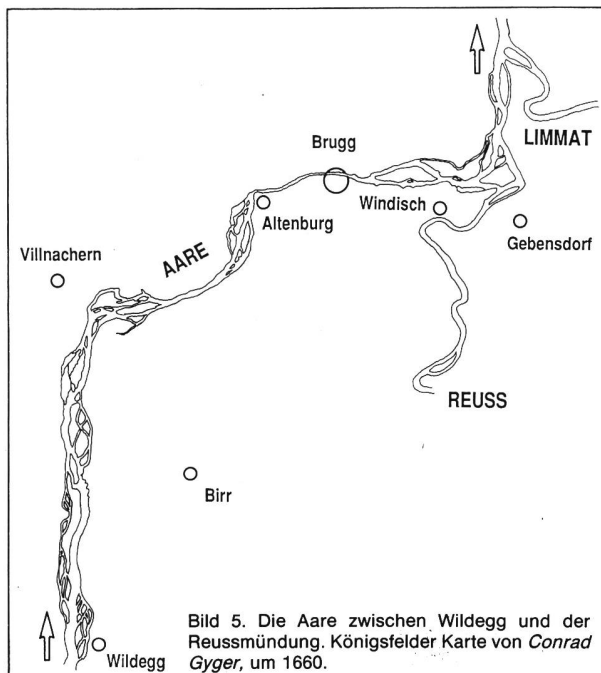


Bild 5. Die Aare zwischen Wildeggen und der Reussmündung. Königsfelder Karte von Conrad Gyger, um 1660.

Langenthal auf 14 m<sup>3</sup>/s beschränkt, weshalb bei Hochwasser ein Grossteil der Geschiebefracht liegenbleibt. Das eher feinere Geschiebe wird jedoch bis in die Aare transportiert und bildet dort ein kleines Delta, das bei Niedrigwasserabfluss der Aare beobachtet werden kann.

#### Wigger

Die Wigger entspringt in mehreren Armen an der Nordostseite des Napfs, wo verschiedene Geschiebeherde zu einem beträchtlichen Geschiebeaufkommen führen können. An ihrer Mündung bei Aarburg wird das Geschiebe kommerziell gebaggert, so dass nur bei mehreren aufeinanderfolgenden geschiefbeführenden Hochwassern ein Teil dieses Geschiebes bis in die Aare gelangt und damit der folgenden Räumung entkommt.

#### Dünnern

Die ausgedehnte Talebene von Niederbipp bis Olten ist zwischenzeitlich durch die Aare aufgeschottert worden. Seit sich der Aarelauf gegen Süden (Aarwangen–Aarburg) verlegt hat, vermag die Dünnern ihr Geschiebe – infolge der Gefällereduktion bei Oensingen – nicht mehr bis in die Aare zu transportieren. Das Geschiebe wird heute beim Gefälleknick oberhalb von Oensingen durch einen Geschiebesammler aufgefangen.

#### Suhre

Das aus dem obersten Einzugsgebiet anfallende Geschiebe lagert sich im Sempachersee ab. Flussabwärts vom See münden zwei bedeutendere Seitenbäche in die Suhre, die jedoch beide einen Geschiebesammler aufweisen. Ein Geschiebetransport als Folge von Gerinneveränderungen kann ausgeschlossen werden, da das Flussbett der Suhre künstlich abgeplästert ist. Aus dem Einzugsgebiet der Wyna, die sich oberhalb Aarau in die Suhre ergiesst, ist eine geringe Geschiebefracht in der Grössenordnung von wenigen 100 m<sup>3</sup> wahrscheinlich.

#### Aabach

In seinem Einzugsgebiet liegen der Baldegger- und der Hallwilersee, in denen sich die transportierten Feststoffe gesamthaft abgelagern. Die Geschiebefracht in die Aare ist unbedeutend.

#### Bünz

Die Topographie dieses schmalen und flachen Einzugsgebiets deutet auf ein sehr beschränktes Geschiebeaufkommen hin.

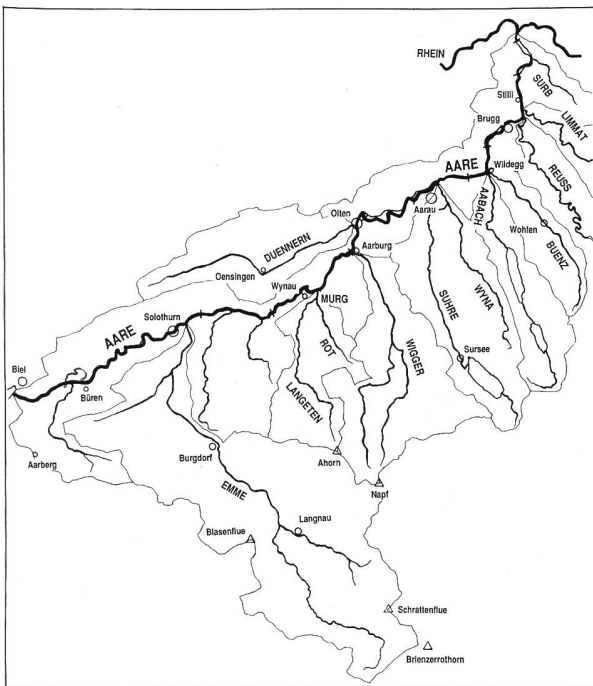


Bild 7. Das Einzugsgebiet und die Zuflüsse der Aare zwischen dem Bielersee und der Reussmündung.

### Reuss

Im Einzugsgebiet der Reuss zwischen Vierwaldstättersee und Aare ist die Kleine Emme der Hauptgeschiebelieferant. Obschon aus ihrem Gerinne durch Baggerungen Geschiebe entnommen wurde, konnte bis zum Jahr 1975 bei grösseren Hochwassern ein Teil dieses Materials stossweise durch die verschiedenen kleineren Flusskraftwerke bis zur Aare transportiert werden. Seit dem Bau des Kraftwerks Bremgarten-Zufikon, das den rund 5 km langen Flachsee aufstaut, wird die gesamte Geschiebefracht aufgefangen. Eine Absenkung oder Spülung des Stauraums ist wegen der überregionalen ökologischen Bedeutung dieses flachen Staubeckens nicht sinnvoll. Flussabwärts vom Kraftwerk muss mit einer fortschreitenden Ausräumung der Strecke gerechnet werden, wodurch noch eine gewisse (wenn auch geringe) Geschiebemenge der Aare zugeführt wird.

### Limmat

Zwischen dem Zürichsee und der Aare münden ausser der Sihl und der Reppisch keine bedeutenden Seitenflüsse in die Limmat. Die Grösse des Stauraums des weiter flussabwärts liegenden Kraftwerks Wettingen lässt vermuten, dass auch bei Hochwasser kein Geschiebe das Unterwasser erreicht. Da die Limmat flussabwärts von Baden streckenweise durch weitere kleinere Kraftwerke zurückgestaut ist, kann auch ein kleineres Geschiebeaufkommen als Folge von Ufererosion oder einer leichten Sohleneintiefung praktisch ausgeschlossen werden.

Neben der Geschiebeproduktion in den Einzugsgebieten der Zuflüsse kann aus der Aare direkt, durch verschiedene Prozesse, Geschiebe zugeführt werden:

- durch Ufererosion (Rutschungen, Unterspülungen)
- durch Tiefenerosion
- als Folge einer Laufverlegung (Mäandermigration)
- durch die Verwitterung anstehender Molasse.

Die Materialkubaturen, die durch diese (meist langsamen) Prozesse freigesetzt werden, sind in den Mittellandflüssen

meistens bescheiden. Insbesondere seit dem Kraftwerksausbau sind Erosionen im Aaregerinne praktisch vollständig verhindert worden. Neben den Ausleitstrecken gewisser Kanalkraftwerke sind als letzte Geschiebelieferanten vor allem die drei verbleibenden Strecken mit frei strömendem Abfluss und natürlichem Abflussvolumen zu nennen. Diese liegen zwischen dem Kraftwerk Wynau und Murgenthal (ca. 4500 m), zwischen dem Kraftwerk Ruppoldingen und Olten (ca. 5000 m) sowie zwischen Brugg und Stilli (ca. 5500 m). Bei diesen drei Strecken ist der ursprüngliche Charakter der Aare noch am besten erhalten geblieben, und alle weisen natürlich entstandene Inseln auf.

Im weiteren wird der Zustand und die zukünftige Entwicklung von zwei dieser Strecken ausführlicher beschrieben. Als Beispiel eines Aareabschnitts von grundlegend verschiedenem Charakter folgt jedoch zunächst eine Darstellung der Strecke Büren–Solothurn.

### Abschnitt Büren–Solothurn

Diese Strecke stellt insofern eine Besonderheit dar, als das Gefälle sehr klein ist (um 0,1 ‰) und die Sohle mehrheitlich aus Feinsanden besteht. Die Aare hat hier den Charakter eines Tieflandflusses. Bei kleineren Abflüssen wirkt sich der Rückstau des Kraftwerks Flumenthal durch die Bedingung der II. Juragewässerkorrektur, den Wasserspiegel bei der Rötibrücke in Solothurn konstant zu halten, flussaufwärts bis zum Regulierwehr Port aus. Bei grossen Abflüssen ergibt sich dagegen eine Spiegelabsenkung [7].

Im Zusammenhang mit der II. Juragewässerkorrektur, bei der eine geringere Wasserspiegelschwankung des Bieler- und Neuenburgersees angestrebt wurde, musste auch die Abflusskapazität der Strecke Büren–Solothurn erhöht werden. Es wurde damals angenommen, dass als Folge der grösseren Abflussmengen und der obenerwähnten Spiegelabsenkung relativ rasch eine Sohleneintiefung eintreten würde und sich somit weitergehende Massnahmen erübrigen würden. Die bisherige Entwicklung hat jedoch gezeigt, dass diese Erosionsprozesse bedeutend langsamer als erwartet ablaufen. Die Sohle hat sich von 1973 bis 1983 nur um maximal 30 cm eingetieft.

In einer neueren Untersuchung [4] wurden die Ursachen für diese stark verzögert verlaufende Erosion abgeklärt. Eine besondere Bedeutung spielen dabei Sohlenformen (Dü-



Bild 8. Sohlenformen (Dünen) der Aaresohle bei der Insel von Nennigkofen. Fliessrichtung von links nach rechts.

nen), die sich aus dem anstehenden Feinsand aufbauen (Bild 8). Die Entstehung und die Grösse von Dünen ist abhängig von der Kornreynoldszahl und der relativen Rauigkeit (Verhältnis zwischen Abflusstiefe und dem Durchmesser des Rauigkeitselements). In Abhängigkeit der Abflussmengen bilden sich Dünen mit einer Höhe zwischen 0,5 und 2,0 m (grössere Abflüsse bilden höhere Dünen). Der Geschiebetransport erfolgt durch die Wanderung der Dünen, deren Geschwindigkeit bei einem Hochwasserabfluss von 500 bis 600 m<sup>3</sup>/s in der Grössenordnung von 0,2 m/h liegt (entspricht rund 5 kg/s Geschiebe). Für einen Abschnitt von 10 km Länge und 80 m Breite ergibt dies eine Erosionsrate von 0,3 mm/Tag oder 10 cm/Jahr (bei ständiger Hochwasserführung), sofern von oben keine Sedimentzufuhr erfolgt. Berücksichtigt man zudem, dass aus der alten Aare und den weiteren Zuflüssen gleichzeitig eine gewisse Zufuhr von Feinsanden in die untersuchte Strecke stattfindet, so wird deutlich, dass die natürlichen Erosionsprozesse trotz dem feinen Sohlenmaterial nur sehr langsam ablaufen.

### Abschnitt Kraftwerk Wynau–Murgenthal

Diese 4,5 km lange Flussstrecke ist durch eine ausgeprägte Mäanderschleife und ein stark variierendes, unregelmässiges Querprofil gekennzeichnet. Als einzigartig darf sicher die Rechtskrümmung mit dem Prallhang von Wolfwil (teilweise aus Molasse bestehend) und die folgende starke Verbreiterung des Profils mit den zwei bewachsenen Inseln bezeichnet werden. Die Flusssohle verläuft vorwiegend auf einer 1 bis 3 m mächtigen Schotterschicht, die örtlich im Bereich des Talwegs bis auf die Molasse abgetragen ist. Das durchschnittliche Gefälle liegt um 1‰, örtlich können jedoch Maximalwerte um 2,5‰ auftreten.

Untersucht man die Veränderung dieses Streckenabschnitts in den letzten 70 Jahren, so stellt man fest, dass sich das Flussbett über weite Strecken um 10 bis 50 cm eingetieft hat. Diese Eintiefung ist im wesentlichen auf den veränderten Geschiebehalt zurückzuführen. Die massiven Baggerungen an der Emme zwischen dem Anfang dieses Jahrhunderts und den fünfziger Jahren, die häufig Werte um 80000 m<sup>3</sup>/Jahr erreichten und in vermindertem Umfang bis heute andauern, die Erstellung des Geschiebesammlers an der Emme im Jahr 1968 sowie die Baggerungen der Unterwasserstrecken der Kraftwerke Flumenthal (1969/70) und Bannwil (1970) verhindern heute die Geschiebezufuhr vom Oberwasser praktisch vollständig.

Damit die bisherigen und die zukünftigen Prozesse im Detail erkannt werden können, sind neben der Gerinnegeometrie und den Abflussverhältnissen genaue Kenntnisse über die Zusammensetzung des Sohlenmaterials und des laufenden Geschiebes notwendig. Das gröbere Sohlenmaterial ist in der Regel im Bereich beanspruchter Ufer und im Talweg zu finden, wogegen das laufende Geschiebe feiner ist, über dem gröberen Sohlenmaterial bereits bei kleineren Hochwassern transportiert werden kann und besonders in Form von Kiesbänken auffällt oder das «Fundament» von bewachsenen Inseln bildet.

Die kritischen Abflüsse bezüglich der Erosion betragen für ein Profil im Bereich der Inseln für das laufende Geschiebe rund 350 m<sup>3</sup>/s und für das Sohlenmaterial rund 900 m<sup>3</sup>/s (der durchschnittliche Abfluss der Aare beträgt 268 m<sup>3</sup>/s). Dies bedeutet, dass bei Abflüssen über 350 m<sup>3</sup>/s die Kiesbänke langsam flussabwärts wandern. Wird nun kein Geschiebe vom Oberwasser her zugeführt, so setzt eine lang-



Bild 9. Zusammenfluss der Aare und der Reuss, Luftbilder von 1935, 1976 und 1988 (Aufnahmen des Bundesamtes für Landestopographie).



same Ausräumung des Flussbetts ein: Die Sohle vergrößert sich zunehmend und gewisse den Flussraum prägende Elemente wie Inseln drohen zu verschwinden oder mit dem Ufer zusammenzuwachsen. In der Flussschlaufe von Wolfwil ist von diesen Prozessen die Solothurner Insel besonders betroffen. Wegen der im Talweg anstehenden Molasse findet keine Tiefen-, sondern eine Seitenerosion statt. Das Hauptgerinne wird sich daher auf Kosten der Insel ausweiten. Gleichzeitig wird sich der Wasserspiegel leicht absenken, womit die Berner Insel immer seltener umspült wird und ein Zusammenwachsen mit dem rechten Ufer wahrscheinlich ist.

Über die gesamte Strecke betrachtet, muss bei weiterhin ausbleibender Geschiebezufuhr in den nächsten Jahrzehnten mit einer weiteren Eintiefung der Sohle bis zu 40 cm und einer teilweisen Erosion der exponierten Insel gerechnet werden. Bei einer natürlichen Geschiebezufuhr hingegen würde dieselbe Erosion geologische Zeiträume beanspruchen, und die Inseln würden immer wieder neu aus lauffendem Geschiebe gebildet.

### *Zusammenflussbereich Aare–Reuss*

Vor dem Zusammenfluss mit der Reuss weitet sich die Aare auf und bildet zwei Gerinne, die eine kleine Insel umströmen. Die Bildung dieser Insel ist zu Beginn dieses Jahrhunderts durch die Auflandung einer Kiesbank ermöglicht worden. Kiesbänke entstehen bevorzugt bei einer Verbreiterung des Querprofils oder wie hier bei einer Mündung. Dabei wird das Geschiebe als Folge unterschiedlicher Fließgeschwindigkeiten hauptsächlich in der Mitte des Profils abgelagert. Falls sich die Kiesbank weiter ausdehnt und deren Oberfläche immer öfter über den Wasserspiegel reicht, können unter günstigen Bedingungen Samen angepasster Pflanzen keimen. Durch das Wachstum dieser Pflanzen (v.a. Weidegebüsch) wird die Fließgeschwindigkeit zusätzlich reduziert, was die Ablagerung von Feinsand und anderen Schwebstoffen begünstigt; ein weiteres Wachstum der Insel ist die Folge. Aus den Luftbildern der Jahre 1935, 1976 und 1988 (Bild 9) ist die Veränderung der Mündung und der Insel deutlich zu erkennen. Bis zum Jahre 1976, wo die Insel mit 78 a ihre grösste Ausdehnung erreichte, hat ihre Fläche vor allem in trockenen Perioden stets zugenommen. Seither ist sie innerhalb von nur 12 Jahren auf 4 a erodiert worden. Die Ursache dieser rasch fortschreitenden Erosion beruht einerseits auf der Häufung von ausserordentlichen Hochwassern, andererseits liegt es in der Natur solcher Auengebiete, dass ihr Widerstandsvermögen gegenüber Hochwasserabflüssen mit zunehmendem Alter des Bewuchses abnimmt. Die Erosion der Schwebstoffablagerungen und das Umkippen der Bäume gehören daher zur Dynamik solcher Gebiete.

Die Geschiebezufuhr hat sich aufgrund der dargestellten Eingriffe in den Fließgewässern zunehmend verkleinert, darf aber, im Gegensatz zur Strecke Wynau–Murgenthal, nicht vernachlässigt werden. Durch die anhaltende langsame Ausräumung des Gerinnes flussaufwärts (Strecken Wynau, Olten, Restwasserstrecke Schinznach–Brugg) und eine geringe Geschiebezufuhr von den Seitenbächen findet bei Hochwasser noch ein gewisser Geschiebetransport vom Oberwasser her statt.

Abfluss- und Erosionsberechnungen haben gezeigt, dass sich die Aare auch in diesem Abschnitt bei gleichbleibender oder weiter abnehmender Geschiebezufuhr in Zukunft leicht eintiefen wird. Im Bereich des schmalsten Profils (flussabwärts der ARA Brugg) setzt die Sohlenerosion bei 640 m<sup>3</sup>/s ein. Dieser Abfluss wird an durchschnittlich 8 Ta-

gen im Jahr erreicht oder überschritten. Im Bereich der Insel liegt der kritische Abfluss bedeutend höher (1200 m<sup>3</sup>/s, ca. 20jähriges Hochwasser), nimmt flussabwärts jedoch wieder auf einen Wert von 750 m<sup>3</sup>/s ab. Die Geschiebezufuhr vom Oberwasser verzögert die Erosionsentwicklung bei überkritischen Abflüssen. Die Eintiefung der Aare führt längerfristig zu einer Reduktion des Gefälles und damit zu einer Drehung des Gerinnes um den nächsten flussabwärts gelegenen Fixpunkt bei Lauffohr (Felsschwelle). Eine Gefällereduktion um 0,5%, die als Maximalwert der zukünftigen Erosionstendenz betrachtet werden kann, würde im Bereich des Zusammenflusses von Aare und Reuss zu einer maximalen Eintiefung von 0,75 m führen.

Was die zukünftige Entwicklung der Insel im Mündungsbereich von Aare und Reuss betrifft, muss angenommen werden, dass die seit gut 10 Jahren zu beobachtenden Erosionsprozesse andauern und die Insel innerhalb weniger Jahre verschwinden wird. Flussaufwärts entsteht jedoch eine neue Kiesbank, die in einigen Jahren die Grundlage für eine neue Insel bieten kann. Wegen des stark reduzierten Geschiebeaufkommens wachsen solche Kiesbänke stets langsamer, und es muss bezweifelt werden, ob die geringe Geschiebefracht für die Wiederholung dieser dynamischen und natürlichen Prozesse auch in Zukunft ausreichend ist.

### *Möglichkeiten zur Erhaltung der natürlichen Dynamik*

Das Ziel der hier diskutierten Massnahmen ist, die natürlich ablaufenden flussmorphologischen Prozesse in den drei letzten ungestaut abfliessenden Streckenabschnitten wieder zu ermöglichen: *Die Erhöhung der Geschiebezufuhr stellt dabei die zentrale Forderung aller Massnahmen dar.* An dieser Stelle werden drei verschiedene Möglichkeiten aufgezeigt, wie dieses Ziel erreicht werden kann:

#### *1. Künstliche Geschiebezufuhr*

Die Geschiebezufuhr mit Hilfe von Bahn, Schiffen, Förderbändern oder Kippern ermöglicht die Zugabe des Geschiebes direkt an der gewünschten Stelle. Das Material kann periodisch zugegeben werden, doch die Wirkung der Massnahme wirkt nur so lange, als mit der Beschickung nicht aufgehört wird. Als Beispiel einer künstlichen Geschiebezufuhr gegen eine massive Sohlenerosion als Folge des Kraftwerkbaus sei der Oberrhein erwähnt, wo bei Iffezheim jährlich rund 200 000 m<sup>3</sup> Material zugegeben werden. An der Aare würde sich die Geschiebezugabe direkt unterhalb des Kraftwerks Wynau besonders günstig auswirken. Die Beschickung von rund 5000 m<sup>3</sup>/Jahr würde ausreichen, die flussmorphologische Vielfalt der Flusssohle wiederherzustellen. Praktisch liesse sich diese Geschiebezugabe durch täglich 2 bis 3 Lastwagenladungen à 7 m<sup>3</sup> Geschiebe mit relativ geringem Aufwand realisieren.

#### *2. Aufhebung von Geschiebesammlern*

Falls es die Transportkapazität eines Zuflusses erlaubt, können Geschiebesammler so konzipiert werden, dass ein Teil des darin abgelagerten Geschiebes den Sammler passieren und bis in die Aare gelangen kann. Gewisse Geschiebeentnahmestellen, wie diejenige an der Wiggermündung, könnten auch ganz aufgehoben werden. Die Wirkung dieser Massnahmen würde sich je nach Länge und Art der Zwischenstrecke verzögern; der Vollzug der Massnahme ist einmalig.

#### *3. Kontrollierte Ufererosion an der Aare*

An geeigneten Stellen können Uferangriffe zugelassen oder gefördert werden. Damit wird dem Abfluss vor allem bei Hochwasser Geschiebe zugeführt. Gleichzeitig verbreitert



sich das Gerinne, und die Uferböschungen können sich flacher ausbilden. Die Breite dieser der Erosion freigegebenen Landstreifen kann beispielsweise um 10 m liegen, sollte aber den lokalen Gegebenheiten angepasst werden. Durch diese Massnahme kann das Geschiebedefizit für ein paar Jahre reduziert werden, eine längerfristige Lösung des Problems kann aber nicht erreicht werden.

Für die Deckung des Geschiebedefizits aller drei Strecken würde sich wahrscheinlich eine Kombination dieser Massnahmen am besten eignen. Diese könnte sich aus den drei Elementen *Geschiebezugabe bei Wynau – Aufhebung der Kiesentnahmen an der Wiggermündung – Zulassen von Ufererosionen im Mündungsbereich von Aare und Reuss* zusammensetzen. Die Situation der vom Geschiebedefizit am stärksten betroffenen Strecken Wynau–Murgenthal und Aarburg–Olten würde sofort verbessert. Durch die Aufweitung der Aare flussabwärts der ARA Brugg würde, solange sich die anderen zwei Massnahmen noch nicht bis hier auswirkten, lokal dem Abfluss etwas Geschiebe zugeführt, und die Ufer könnten sich flacher und natürlicher ausbilden. Die Gebiete des Windischer und Brugger Schachens sollten ohnehin zum Einflussbereich der Aare gezählt werden. Die Aufhebung des Geschiebesammlers an der Emmemündung wäre bezüglich des Volumens der Geschiebezugabe die wirkungsvollste Massnahme. Das Geschiebe würde aber von der Aare nicht weitertransportiert, sondern vorerst im Stauraum des Kraftwerks Flumenthal abgelagert. Inwiefern sich die Bildung eines neuen Emmedeltas in unerwünschtem Mass in einer Hebung des Hochwasserspiegels der Aare flussaufwärts auswirkte, wäre vom abgelagerten Geschiebevolumen abhängig. Im weiteren würde sich diese Massnahme, wegen der ausgedehnten Baggerungen im Unterwasser der Kraftwerke Flumenthal, Bannwil und Wynau, erst mehrere Jahrzehnte später im Bereich Wynau–Murgenthal auswirken.

Bei der Projektierung von Massnahmen zur Wiederbelebung des Geschiebetriebs in der Aare müsste den Prozessen, die im Einflussbereich der Juragewässerkorrektur und der Kraftwerke erfolgen, noch besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Einerseits sollte das Geschiebe bei Hochwasser die Wehre passieren können, und andererseits darf die Betriebssicherheit der Kraftwerke nicht beeinträchtigt werden. Bei gewissen Kraftwerken muss dabei, wegen Auflandungen im Unterwasser, mit einer gewissen Reduktion der nutzbaren Fallhöhe gerechnet werden.

### Schlussbemerkungen

Durch die vorgeschlagenen Massnahmen können bei den drei verbleibenden, frei fliessenden Strecken Wynau–Murgenthal, Ruppoldingen–Olten und Brugg–Stilli die natürlichen flussmorphologischen Prozesse teilweise wieder ermöglicht werden. Heute wird die Flusssohle dieser Strecken zunehmend ausgeräumt, das heisst die Sohle vergrößert und verdichtet sich, wird dadurch weniger durchlässig und Makrosohlenformen wie Kiesbänke und Inseln verschwinden mit der Zeit als Element der Flusslandschaft. Diese Prozesse könnten durch lokale Geschiebezuführen gestoppt und teilweise rückgängig gemacht werden. Nicht zuletzt würden damit auch die Laichmöglichkeiten der Fische und die Lebensbedingungen des Zoobenthos wesentlich verbessert. Durch die beschriebenen Massnahmen würden keine künstlichen Flusslandschaften erzeugt, sondern es würde eine Korrektur der bisher im Einzugsgebiet erfolgten Eingriffe ermöglicht. Mit Massnahmen für die Erhaltung dieser typischen drei Aareabschnitte könnte hier der Cha-

rakter der natürlichen Aare im wesentlichen erhalten werden; ihre Bedeutung als landschaftlich wertvolle und naturnahe Elemente würde damit stärker anerkannt.

#### Literaturangaben

- [1] *Gotthelf, J.*: Die Wassernot im Emmental. Am 13. August 1837. Gute Schriften Bern, Nr. 14.
- [2] *Müller, H.* (1957): Die Juragewässer und ihre erste Korrektur. Wasser- und Energiewirtschaft, Nr. 7/8/9.
- [3] UVP Neuanlage KW Wynau (1987). Ökologische Risikoanalyse. Ottomar Lang AG und beteiligte Fachleute und Institutionen.
- [4] VAW-Bericht Nr. 909: Emme 2050 (1987). Studie über die Entwicklung des Klimas, der Bodenbedeckung, der Besiedlung, der Wasserwirtschaft und des Geschiebeaufkommens im Emmental sowie über die Sohlenentwicklung und den Geschiebehaushalt in der Emme und mögliche zukünftige Verbauungskonzepte. Unveröffentlicht.
- [5] VAW-Bericht Nr. 919 (1987): Aare-Erosion. Bericht über die Untersuchungen betreffend das Ausmass und den zeitlichen Ablauf der erwarteten Sohlenerosion in der Aarestrecke zwischen Büren und Solothurn. Unveröffentlicht.
- [6] VAW-Bericht Nr. 957 (1988): Insel beim Zusammenfluss von Aare und Reuss. Bericht bezüglich der Entstehung und der zukünftigen Entwicklung der Insel. Unveröffentlicht.
- [7] *Vischer, D.* (1969): Das Aarekraftwerk Flumenthal. Die Wasserwirtschaft, Jg. 59, Heft 2.
- [8] *Vischer, D.*, und *Fankhauser, U.* (1990): 275 Jahre Kanderumleitung. Wasser, Energie, Luft, Nr. 1/2.

Adresse des Verfassers: *Ueli Schälchli*, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zentrum, CH-8092 Zürich.

## Boris A. Bakhmeteff (1880–1951)

Geboren in Tiflis im Kaukasus, erwarb sich *Bakhmeteff* das Diplom 1903 in St. Petersburg, um anschliessend ein Jahr an der ETH Zürich zu verbringen. 1911 promovierte er am Polytechnikum St. Petersburg, wo er gleichzeitig auch Unterricht in Hydraulik erteilte. Während des Ersten Weltkrieges wurde er als Bevollmächtigter Russlands in die USA geschickt, um die provisorische Kerensky-Regierung als Unterstaatssekretär zu vertreten.

Um 1923 eröffnete er ein Ingenieurbüro in New York und nahm 1931 die Hydraulik-Professur an der Columbia-Universität an. 1935 wurde er amerikanischer Staatsbürger und verbrachte sein restliches Leben in den USA.

Bereits 1912 schrieb er ein russisches Hydraulikbuch, das zum erstenmal das Energie-Durchfluss-Diagramm enthielt. Sein zweiter Wurf gelang ihm 1932 mit dem bekannten Werk «Hydraulics of Open Channels», das speziell den Stau- und Senkungskurven gewidmet ist. Weitere wichtige Beiträge folgten 1936 über klassische Wassersprünge und 1947 über den Mechanismus des Energieverlustes, welcher ihm die Norman-Medaille von der ASCE eintrug.

Infolge seiner ausserordentlichen Qualitäten wurde *Bakhmeteff* ein Begutachter von weitreichenden Forschungsangelegenheiten und Berater für hydraulische Versuchsanstalten. Dabei kamen ihm seine persönliche Ausstrahlungskraft, seine ausserordentliche Vitalität und seine Sprachbegabung sehr zugute. Er war eine der raren Personen, die wissenschaftliche Begabung mit Kultur verbinden konnten, aber ebenso mit Autorität und Freundlichkeit.

WHH

