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

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 78 (1986)

Heft: 9

Artikel: Wellenerosion am Rhein : Auswirkugen der Wellen des Schiffs- und Motorbootverkehrs

Autor: Huber, Andreas / Weiss, Heinz W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940864

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: 10.02.2026

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

Vorwort zum Bericht «Wellenerosion am Rhein»

Die zunehmenden Erosionsschäden am Rheinufer und der damit verbundene Verlust an Natur- und Landschaftswerten haben das Baudepartement des Kantons Thurgau 1984 veranlasst, eine Studie in Auftrag zu geben, welche die Ursachen der Erosion klären und quantifizieren sollte. Ausserdem lautete der Auftrag an die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule, Zürich, und an die Firma Basler und Hofmann AG, Zürich, sowohl organisatorische als auch bauliche und ingenieurbiologische Massnahmen zur Lösung des Problems vorzuschlagen.
Der vorliegende Bericht «Wellenerosion am Rhein» zeigt unerwartet klare Resultate sowohl hinsichtlich der Ursachenermittlung als auch bezüglich der Massnahmen. Jetzt ist ein umfassendes Vernehmlassungsverfahren im Gange, an welchem sich auch der Schweizerische Wasserwirtschaftsverband mit einer unterstützenden Stellungnahme beteiligt hat. Der Bericht und die Ergebnisse der Vernehmlassung sind die Basis für eine Eingabe der Thurgauer Regierung an die zuständigen Bundesbehörden und an die Internationale Schiffahrtskommission für den Bodensee.
Ich begrüsse den Vorschlag der Herausgeber der Fachzeitschrift «wasser, energie, luft», die Kurzfassung des Rheinberichtes zu publizieren und den Inhalt dadurch einem weiten Kreis von Fachleuten der Wasser- und Energiewirtschaft sowie des Umweltschutzes bekannt zu machen.

BAUDEPARTEMENT
DES KANTONS THURGAU

U. Schmidli

Regierungsrat U. Schmidli

Wellenerosion am Rhein

Ufererosion am Thurgauer Hochrhein zwischen Stein am Rhein und Schaffhausen

Auswirkungen der Wellen des Schiffs- und Motorbootverkehrs

Andreas Huber und Heinz W. Weiss

Zusammenfassung

Aufgrund einer Messkampagne wird der Zusammenhang zwischen der Fahrgeschwindigkeit von Booten und Schiffen und den erzeugten Wellen als direkte Ursache der Ufererosion gezeigt. Zur Vermeidung oder Reduktion weiterer Uferschäden werden organisatorische und baulich-ingenieurbiologische Massnahmen empfohlen.

Résumé: Erosion des rives du Rhin due aux vagues – érosion des rives thurgoviennes du Rhin entre Stein am Rhein et Schaffhouse – effets dus aux vagues engendrées par la navigation à moteur

Sur la base d'une campagne de mesures, on montre la relation existant entre la vitesse des bateaux et les vagues engendrées qui sont directement responsables de l'érosion des rives. Afin que des nouveaux dégâts puissent être évités ou réduits dans leur ampleur, des recommandations d'ordre administratif et touchant à l'aspect biologique de l'aménagement des rives sont données.

Abstract: Wave Erosion on the Rhine River – Bank erosion on the upper Rhine river in the canton of Thurgau between Stein am Rhein and Schaffhausen due to motor boat and ship induced waves

On the basis of field measurements the relationship between the speed of boats and ships, the waves they generate, and the degree of bank erosion is shown. To avoid or reduce further damage, organisational and river-engineering/biological measures are recommended.

1. Einleitung

Diese Studie hat zum Ziel, die Ursache der Ufererosionsschäden längs der Flussstrecke zu erfassen und zu quantifizieren. Schliesslich werden konkrete Vorschläge für organisatorische und administrative Vorkehrungen betreffend den Verkehr auf dem Wasser sowie bauliche und ingenieurbiologische Massnahmen bezüglich des Uferschutzes erwartet, die geeignet sind, der fortschreitenden und bereits schwerwiegenden Ufererosion Einhalt zu gebieten.

2. Übersicht über die durchgeführten Messungen

Im Sommer und im Herbst 1984 wurden die Fahrgeschwindigkeiten, Wellenhöhen und Verkehrsfrequenzen der Schiffe und der Motorboote gemessen.
Über die Messtage, Messstellen und Messarten gibt die folgende Aufzählung Auskunft:
– elektronische Wellenmessungen während 3 Tagen in Rheinklingen und bei St. Katharinental (Bild 1)
– manuelle Schwimmerpegelmessungen während 7 Tagen an 6 Stellen zwischen Hemishofen und St. Katharinental
– Geschwindigkeitsmessungen während 6 Tagen an 7 Stellen zwischen Hemishofen und St. Katharinental sowie vom Fahrgastschiff aus
– Verkehrszählungen während 12 Tagen an 7 Stellen zwischen Gottlieben und St. Katharinental
Neben den laufenden Erhebungen des Verkehrs wurden auch systematische Messungen mit dem neuen Fahrgastschiff «Arenenberg», das die Schiffahrtsgesellschaft Untersee und Rhein mit der Mannschaft zur Verfügung stellte, und mit dem Polizeiboot TG 4 der Thurgauer Seepolizei durchgeführt.

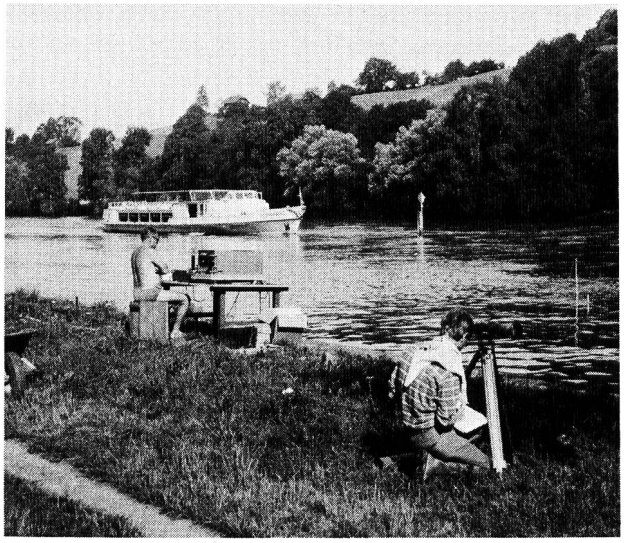


Bild 1. Systematische Wellenmessungen am Fahrgastschiff «Arenenberg» bei St. Katharinental. Am Ufer links der Tisch mit den elektronischen Mess- und Registriergeräten, links das Stativ mit Telemeter zur Distanzmessung, weiter links davon im Fluss eine kapazitive Pegelsonde.

3. Auswertung der Messdaten

Zur Verarbeitung des reichhaltigen Datenmaterials gehören die Berechnungen und Darstellungen folgender Zusammenhänge:
– Beziehung zwischen Motorendrehzahl und Fahrgeschwindigkeit (nur bei den systematischen Messungen)
– Beziehung zwischen Fahrgeschwindigkeit und Wellenhöhe (Schwallhöhe, Sunktiefe)
– Stauwellengeschwindigkeiten (Wellenausbreitungsgeschwindigkeit) in Abhängigkeit der Pegelstände in ausgewählten typischen Querprofilen des Flusses sowohl in als auch entgegen der Fliessrichtung
– Verkehrsfrequenzen in Funktion der Tageszeit an einigen ausgewählten Tagen und Zählstellen

4. Weitere Beurteilungsgrundlagen

Ergänzend wurden beschafft und verwendet:
– zahlreiche Fotos, die anlässlich mehrerer Begehungen und der Messkampagnen aufgenommen worden sind
– Topographien, Situationen, Quer- und Längenprofile der Flussstrecke
– hydrologische Angaben über den Rhein wie Wasserspiegel im Längen- und Querprofil, Abflussganglinien, Pegelrelationen, Dauerkurven, Pegelwerte
– Bootstatistiken des gesamten Bodenseegebietes (zeitliche Entwicklung des Boots- und Schiffsbestandes)
– Verkehrsstatistik der Kursschiffahrt, Passagierzahlen
– einschlägige Fachliteratur, Publikationen, Jahresberichte, Protokolle
– Akten zum Wellenerosionsproblem am Rhein.

5. Ursachen der Erosionsschäden

In einer Analyse wurden die möglichen Ursachen der Ufererosion bestimmt und gewichtet. Als Ursachen sind denkbar: Schiffs- und Bootswellen einschliesslich der Rückströmungen, Windwellen, Sedimenttransport durch die Flussströmung, durch Schiffsschrauben erzeugte Turbulenzen, Uferrutschungen als Folge von Hangvernässungen in rutschgefährdeten Böden, Verwitterung, Kraftwerksbetrieb, direkte menschliche Eingriffe. *Die Untersuchung hat ergeben, dass die in den letzten 2 bis 3 Jahrzehnten in beschleunigtem Masse eingetretenen Ufererosionen (Bild 2) primär den boot- und schiffbedingten Wellen zugeschrieben werden müssen.* Ein Fluss, wie der wenig verbaute Rhein, unterliegt zwar dauernden Veränderungen durch natürliche Einflüsse. Deren Grössenordnung ist jedoch gegenüber dem Angriff der Wellen als Folge des regen bis intensiven Verkehrs gering.

Grundsätzlich sind die Wirkungsweisen und Häufigkeiten der *Wellen grosser Fahrgastschiffe* und der *Motorbootswellen* auseinanderzuhalten:

Schiffswellen zeichnen sich durch eine starke Absenkung des Wasserspiegels (Sunk) längs des die Flussströmung einengenden Schiffes und hernach durch einen raschen Anstieg zu einem Schwall mit überlagertem Zug von Bug- und Heckwellen aus. Diese Überlagerungen können zusammen mit dem Sunk zu sehr grossen Wellenhöhen führen. Am Ufer wurden Höhen bis zu 70 cm gemessen.

Der Erosionsvorgang am Ufer beginnt, indem der Sunk des vorbeifahrenden Schiffes im Innern des Ufers ein Sickergefälle mit entsprechender Strömung erzeugt. Mit anderen Worten: Zwischen dem Grundwasserspiegel und dem Flusswasserspiegel ist innert weniger Sekunden ein starkes Gefälle entstanden. Die Sickerströmung schwemmt die feinen Bodenbestandteile aus den Uferbestockungen und Schilfwurzeln sowie aus den Fugen künstlicher Uferbefestigungen heraus. In lockeren und steileren Böschungen kann sich dieser Vorgang grundbruchartig abspielen. Die entgegen der Fahrtrichtung des Schiffes zielende Rückströmung verfrachtet das losgelöste Ufermaterial in den Bereich grösserer Flusstiefen. Dadurch erleiden sowohl natürliche als auch ungenügend befestigte künstliche Ufer die bekannten Schäden. Bäume und Sträucher verlieren den Halt und kippen in den Fluss, Schilfgürtel werden zurückgedrängt, lockere Uferböschungen werden abgetragen, Blocksätze ohne ausreichenden Vorgrund und Filterschichten sacken ab und zerfallen (Bilder 3 bis 6).

Motorbootswellen erreichen kleinere Höhen als Schiffswellen. Die grössten gemessenen Wellenhöhen betrugen 30 cm. Ein ausgesprochener Sunk fehlt. Es handelt sich um einen längeren Zug oszillierender Wellen, dessen grösste Höhen wie bei grossen Schiffen durch die Überlagerung von Bug- und Heckwellen entstehen. Die schädigende Wirkung der Bootswellen liegt weniger in der Wellenhöhe begründet als in ihrer Häufigkeit und in der Vibrationswirkung auf das feine Ufermaterial (Verflüssigungseffekt). In der Sommersaison fahren auf dem Rhein in beiden Fahrtrichtungen täglich bis zu mehreren 100 Boote. Das Wellenspiel be- und entlastet abwechselnd das Ufermaterial. Körner, die sich in einer Lage nahe der Stabilitätsgrenze befinden, werden durch den plötzlich wirkenden Auftrieb und den Strömungsdruck aus dem Gleichgewicht gebracht und meistens zu einem tiefer liegenden, neuen Standort bewegt.

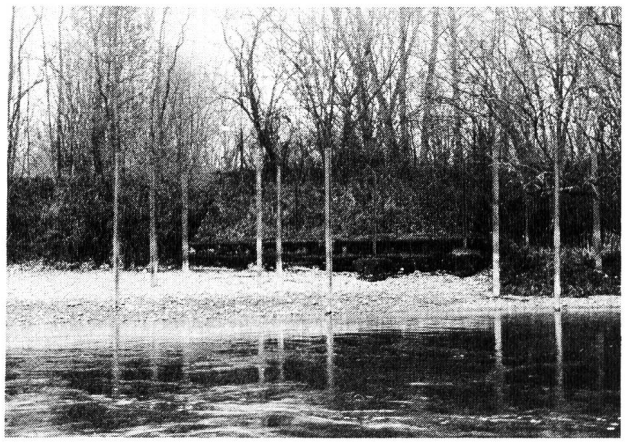


Bild 2. Zeugen der Ufererosion. Die ehemals bodenbündigen Betonsockel der Panzersperre oberhalb Rheinklingen wurden in Ufernähe freigespült und ragen heute, nach etwa 40 Jahren, 40 bis 50 cm aus der Kiesbank heraus.

Bild 3. Rechtes Ufer kurz oberhalb der Hemishoferbrücke. Bei höheren Wasserständen, wie sie im Sommer andauern, schreitet der Erosionssaum stetig landeinwärts, indem die Wellen das Feinmaterial aus den Wurzelstöcken herausspülen und so das Ufergehölz zu Fall bringen.

Bild 4. Solche freigespülte Wurzelstöcke wie dieser am Fusse des Rutschhanges bei Rihalden gibt es entlang der untersuchten Rheinstrecke hunderte.

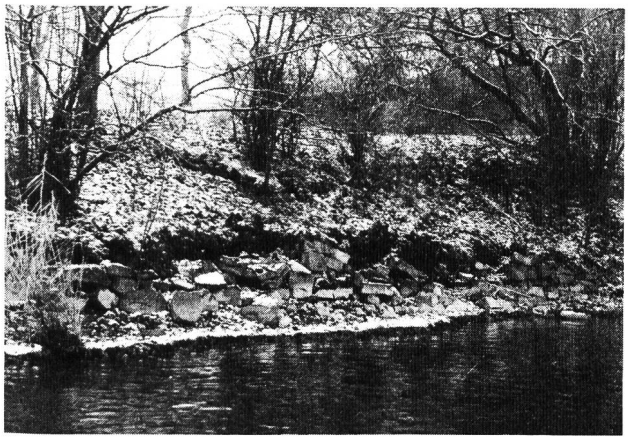


Bild 5. Uferpartie oberhalb Paradies. Die Wellen haben das feinkörnige Unterlagsmaterial aus dem Blocksatz herausgespült, so dass dieser zerfällt. Links ein Überrest des früheren Schilfgürtels.

Bild 6. Bei höheren Wasserständen schwemmen die Wellen das Feinmaterial aus den Schilfwurzeln in das tiefere Wasser. Der Schilfgürtel des Naturschutzgebietes in der Scharenwies ist dadurch gefährdet.

Bild 7 zeigt je ein Beispiel von gemessenen Schiffs- und Motorbootswellen.

6. Einflussgrössen der Wellenhöhen

Verschiedene Parameter beeinflussen die Wellenhöhen am Ufer:

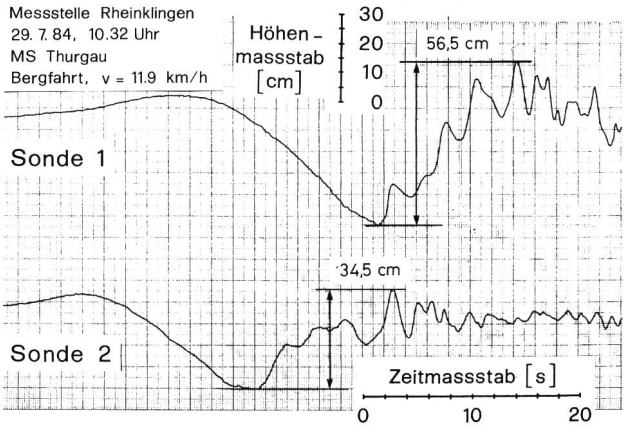
- Fahrgeschwindigkeit und ihr Verhältnis zur Stauwellengeschwindigkeit (abhängig vom Querprofil)
- Schiffsform und Schiffsgrösse
- Lage der Schiffahrtslinie innerhalb des Flusses und Fahrweise (mittige und aussermittige Fahrten, Kurvenfahren, Zu- und Abfahrten vom Ufer)

Im Vordergrund steht das Problem der Fahrgeschwindigkeit. Bei Motorbootsfahrten wird grundsätzlich unterschieden zwischen *verdrängender Bewegung* und *gleitender Bewegung.* Ist die Fahrgeschwindigkeit geringer als die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit (in der Schiffahrt auch als Stauwellengeschwindigkeit bezeichnet), so ist die Bewegung verdrängend. Der Bug bleibt im Wasser und verdrängt dieses. Nach dem Überschreiten der Stauwellengeschwindigkeit wird der Bug aus dem Wasser gehoben, und die gleitende Bewegung setzt ein. Die Stauwellengeschwindigkeit ist von der Geometrie des Abflussprofils, insbesondere von der Abflusstiefe abhängig. Im Gegensatz zu Verhältnissen im ruhenden Wasser ist die Stauwellengeschwindigkeit in einem Fluss entgegen der Strömung um die Strömungsgeschwindigkeit reduziert und in der Strömungsrichtung um die Strömungsgeschwindigkeit erhöht.

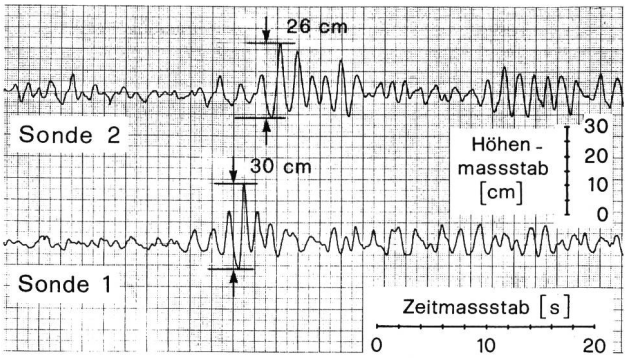
Grosse Fahrgastschiffe, schwache Motorboote und Ruderboote erreichen die Geschwindigkeitsgrenze zur gleitenden Bewegung in der Regel nicht.

Es ist bekannt, und die Messungen am Rhein haben dies auch bestätigt, dass die Wellenhöhen ein Maximum erreichen, wenn die Fahrgeschwindigkeit mit der Stauwellengeschwindigkeit übereinstimmt (ähnlich der Schallmauer bei schnellen Flugzeugen). Erhöht sich die Fahrgeschwindigkeit des verdrängenden Fahrzeuges nach dem Überschreiten der halben Stauwellengeschwindigkeit weiter, so nimmt die Wellenhöhe rapide zu. Durch Fahrgeschwindigkeiten in diesem Geschwindigkeitsbereich erhöhen sich die erzeugten Wellen in einem beträchtlichen Ausmass.

Bild 7. Typische Wellenaufzeichnungen.



Aufzeichnung von Schiffswellen. Typisch ist der starke Abfall des Wasserspiegels (Sunk). Die folgende höchste Spitze entsteht durch Überlagerung von Bug- und Heckwellen.



Aufzeichnung von Motorbootswellen, Fahrgeschwindigkeit des Bootes (Polizeiboot TG 4) 23,3 km/h, talwärts. Messstelle bei St. Katharinental.

Der Zusammenhang zwischen der Fahrgeschwindigkeit und der Wellenhöhe ist gesondert für Berg- und für Talfahrten für das Fahrgastschiff Arenenberg und das Polizeiboot TG 4 in den Bildern 3 bis 6 aufgrund der durchgeführten systematischen Messungen aufgezeichnet. Diese Diagramme sind eine massgebende Grundlage zu den abgegebenen Empfehlungen über die zulässigen Fahrgeschwindigkeiten.
Die Kurven zeigen, dass bei den bergwärts fahrenden Schiffen und Booten die Wellenhöhe oberhalb Fahrgeschwindigkeiten von 10 km/h stark zunimmt und bei wenigen km/h Mehrgeschwindigkeit Wellen der mehrfachen Höhe erzeugt werden. Bei talwärts fahrenden Schiffen ist der Sachverhalt ähnlich mit dem Unterschied, dass der starke Anstieg der Wellenhöhe oberhalb etwa 18 km/h einsetzt.
Charakteristisch an den Kurven ist die Form. Von Schiff zu Schiff (bzw. von Boot zu Boot) unterschiedlich sind die Wellenhöhen, auch an der selben Messstelle. Das Kursschiff «Thurgau» erzeugt bedeutend höhere Wellen als das für die systematischen Versuche verwendete etwa gleich grosse Fahrgastschiff «Arenenberg» bei der gleichen Fahrgeschwindigkeit von etwa 9,3 km/h (Bild 8). Bei allen gemessenen Kursfahrten waren die Wellen der «Arenenberg» weniger hoch als diejenigen der «Thurgau». Die sorgfältige Bemessung der Schale des neuen Fahrgastschiffs «Arenenberg» hat sich gelohnt.
Die Stauwellengeschwindigkeit als von der Wassertiefe abhängige Grösse verändert sich mit der Wasserführung des Rheins und mit dem Querprofil in gewissen Grenzen. Das aus diesem Grund variable Fahrgeschwindigkeit/Stauwellengeschwindigkeit-Verhältnis wirkt sich somit zeitlich und örtlich auch auf die Wellenhöhe aus.
Auch bei Motorbooten treten beträchtliche Streuungen zwischen den Wellenhöhen bei gleichen Fahrgeschwindigkeiten auf.
Beizufügen ist noch, dass die Wellenenergie, die mit der Zerstörungsarbeit an den Ufern in direktem Zusammenhang steht, proportional zum Quadrat der Wellenhöhe ist.

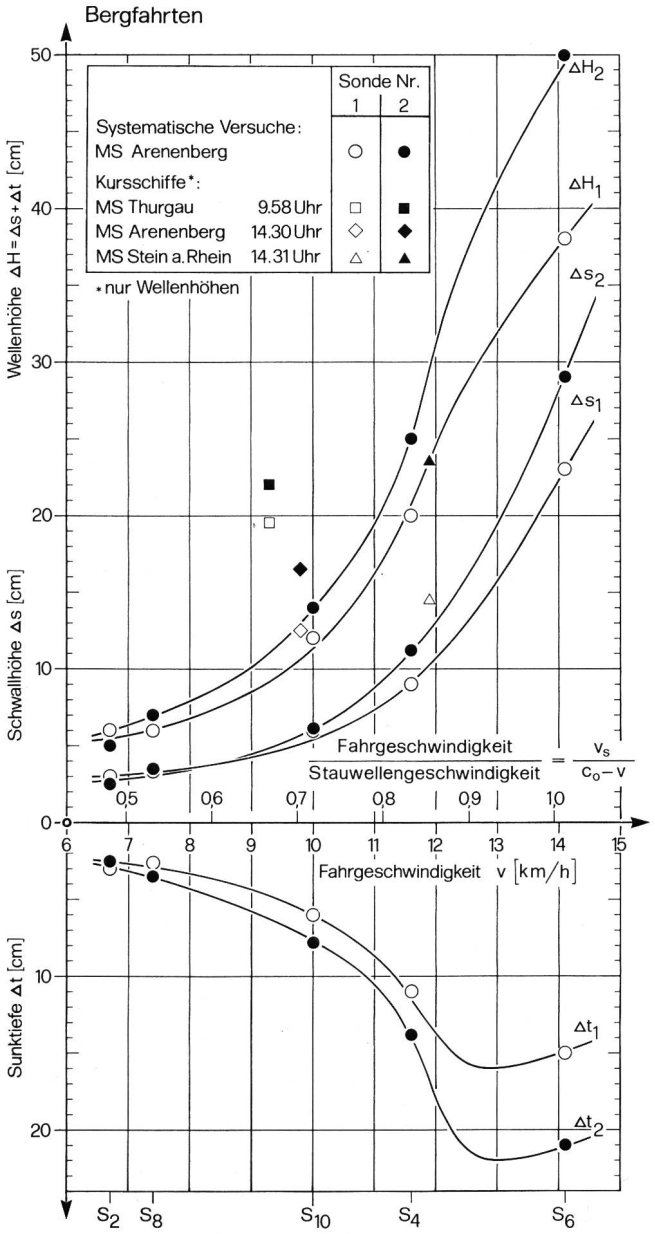


Bild 8. Wellenhöhen, Schwallhöhen und Sunktiefen in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit des Fahrgastschiffes «Arenenberg», systematische Messungen vom 30. Juli 1984 unterhalb St. Katharinental. Rheinabfluss etwa 450 m³/s.

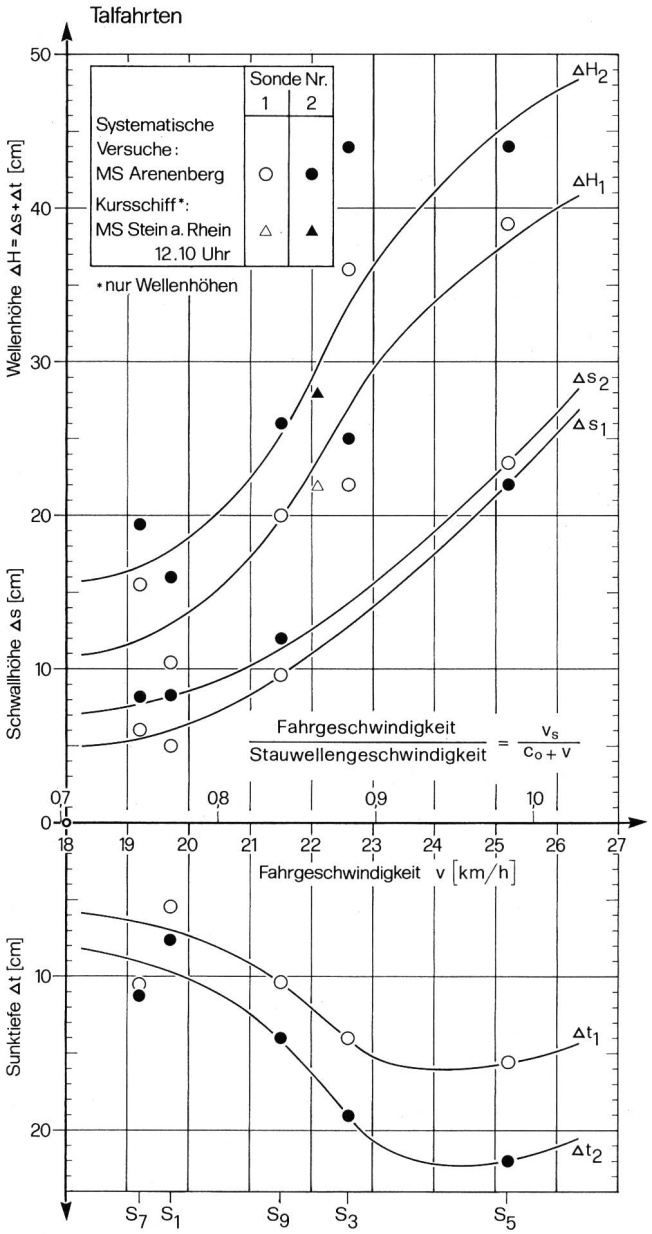


Bild 9. Wellenhöhen, Schwallhöhen und Sunktiefen in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit des Fahrgastschiffes «Arenenberg», systematische Messungen vom 30. Juli 1984 unterhalb St. Katharinental, Rheinabfluss etwa 450 m³/s.

Fährt beispielsweise ein Fahrgastschiff mit einer Geschwindigkeit von 22 km/h rheinabwärts (aktuelle Fahrgeschwindigkeit der Kursschiffe), so sind Wellenhöhen von mindestens 0,25 m zu erwarten (Bild 9). Unter ungünstigen Bedingungen (z.B. an Kurvenaussenseiten und bei ungünstig geformten Schiffsschalen) kann die Welle auch das 2-bis 3fache dieser Höhe erreichen. Würde die Geschwindigkeit auf 18 km/h begrenzt, so betrüge die Wellenhöhe noch etwa die Hälfte. Mit der Geschwindigkeitsreduktion von 22 auf 18 km/h kann demnach die Wellenenergie auf ein Viertel des heutigen Wertes herabgesetzt werden.

7. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

7.1 Allgemeines

Die Ufer der noch weitgehend natürlichen Rheinstrecke zwischen Untersee und Paradies/Schaffhausen sind heute stark durch den Wellenschlag des Motorboot- und Passagierschiffverkehrs gefährdet. Das Gefährdungspotential hat sich in den letzten 20 Jahren massiv erhöht. Allein im Kanton Thurgau nahm die Zahl der mit Motoren ausgerüsteten Boote aller Arten zwischen 1964 und 1984 von 1341 auf 5200 Einheiten zu. Auf dem gesamten Bodensee waren 1983 31 644 Motorboote immatrikuliert. Unter der heute geltenden Bodenseeschiffahrtsverordnung vom 1. April 1976 mit den hohen zulässigen Fahrgeschwindigkeiten auf dem Rhein von 30 km/h in beiden Richtungen muss bei dieser hohen und allenfalls noch zunehmenden Belastung durch den Motorbootsverkehr auch in Zukunft mit einer progressiven Zunahme der Erosionsschäden und mit hohen Instandstellungskosten zulasten der öffentlichen und privaten Uferanstösser gerechnet werden. Ausserdem erleiden die Naturufer kaum wieder gutzumachende Schäden wie Verluste der wenigen noch verbliebenen Schilfgürtel, die Unterspülung der bestockten Ufer und die Auslösung ausgedehnter Hangrutschungen.

Ohne einschneidende Massnahmen lässt sich die unerfreuliche Entwicklung der Uferzerstörung nicht aufhalten. Es ist zu unterscheiden zwischen *organisatorischen Massnahmen* einerseits und *baulich-ingenieurbiologischen Massnahmen* andererseits. Während die erstgenannten in der Durchsetzung schärferer Verordnungen bestehen und vorbeugend wirken, also auf die Verhinderung der Schadenursachen abzielen und deshalb auch als aktive Massnahmen bezeichnet werden können, sollen die zweitgenannten den Schadenswirkungen entgegentreten, sie weisen deshalb einen passiven Charakter auf.

Allein in der Thurgauer Rheinstrecke zwischen Untersee und Paradies musste die Öffentlichkeit in den letzten Jahren durchschnittlich 150000 bis 200000 Franken für den Unterhalt und die Sanierung der Ufer aufwenden. Etwa die Hälfte dieser Summe wird von der Kraftwerk Schaffhausen AG aufgebracht, weil diese innerhalb der Staustrecke wuhrpflichtig ist. In diesen Beträgen sind die Aufwendungen privater Uferanstösser nicht enthalten. Zudem ist zu berücksichtigen, dass das Ausmass der nicht behobenen Schäden in den letzten Jahren stark zugenommen hat. Schätzungen haben ergeben, dass – je nach zukünftiger Verkehrsstrategie – unterschiedliche finanzielle Konsequenzen entstehen. Falls die vorgeschlagenen organisatorischen Massnahmen konsequent durchgeführt werden, dürfte innert 10 bis 15 Jahren mit einem wasserbaulichen Sanierungsaufwand von 1 bis 3 Mio Franken zu rechnen sein. Würde auf die Einschränkungen im Boots- und Schiffsverkehr verzichtet, wäre das Resultat eine weitgehend zerstörte Uferlandschaft; für den massiveren und ästhetisch fragwürdigen Uferschutz müsste eine Summe von 7 bis 13 Mio Franken aufgewendet werden.

Organisatorische und bauliche Massnahmen ergänzen sich und dürfen nicht als Alternativen aufgefasst werden. Obschon zerstörte Naturufer dank baulich-ingenieurbiologischen Massnahmen einigermassen naturnah gestaltet werden können, büssen sie dadurch von ihrer Ursprünglichkeit ein und sind mit ästhetischen und ökologischen Nachteilen behaftet. Bei den heutigen Wellenschlagverhältnissen müssen vorwiegend bautechnische Methoden eingesetzt werden, weil die ingenieurbiologischen Verbauungen im Hauptangriffsbereich den Wellen nicht standhalten. Durch Uferschutzmassnahmen allein kann das Ziel der Erhaltung einer teilweise natürlichen Rheinstrecke nicht erreicht werden. Die Bedeutung der organisatorischen Massnahmen zur Drosselung der Wellenbelastungen ist deshalb vorrangig.

7.2 Organisatorische Massnahmen

Reduktion der Fahrgeschwindigkeit

Dies ist die wichtigste der erforderlichen Massnahmen. Die empfohlenen Geschwindigkeitsbegrenzungen beruhen auf den Ergebnissen der Wellenmessungen und auf den Erkenntnissen über den Zusammenhang zwischen dem Verhältnis Fahrgeschwindigkeit/Stauwellengeschwindigkeit und den Höhen der erzeugten Wellen.

Es sei folgende generelle Geschwindigkeitsbeschränkung für Kursschiffe und Motorboote empfohlen:

Bergfahrt: 10 km/h Talfahrt: 18 km/h

Unter diesen Geschwindigkeitslimiten entstehen Wellen, deren Höhen und Erosionswirkungen noch in einem vertretbaren Bereich liegen. Bei den grossen Schiffen ist noch mit höchstens 25 cm hohen und bei den Motorbooten mit 15 cm hohen Wellen zu rechnen, dies allerdings bei genügend grossen Uferabständen. Die maximalen Geschwindigkeiten von 10 bzw. 18 km/h liegen im Rahmen von Auflagen, welche auch auf andern schiffbaren schweizerischen und ausländischen Gewässern gemacht werden. Die Limiten der heute geltenden Verordnung von 30 km/h in beiden Verkehrsrichtungen liegen massiv über dem üblichen Mass. Auf den meisten Fliessgewässern der Schweiz und des Auslandes liegen die Grenzen unter 15 km/h.

Die Geschwindigkeitsmessungen an Kursschiffen haben gezeigt, dass die mittleren Werte bergwärts 10 bis 12 km/h, talwärts 20 bis 24 km/h betragen. Die vorgeschlagenen Reduktionen bedeuteten also eine schwache Einschränkung der Reisegeschwindigkeiten. Spitzen allerdings, wie sie bei Personenschiffen sporadisch gemessen wurden, sind konsequent zu vermeiden. Es besteht die Möglichkeit, die generell zulässige Höchstgeschwindigkeit der Kursschiffe streckenweise leicht anzuheben, nämlich dort, wo in grossen Wassertiefen meist enger Flussstrecken gefahren wird und demzufolge das Fahrgeschwindigkeit/Stauwellengeschwindigkeit-Verhältnis günstiger liegt. Diese Ausnahmen bedürfen noch der näheren Abklärung.

Die Messungen an Sportmotorbooten zeigten, dass diese die heute zulässigen Limiten oft ausschöpfen oder überschreiten. In der Kategorie der starken Sportboote muss das Fehlverhalten entsprechend deutlich angepasst werden. Um massive Geschwindigkeitsübertretungen durch starke Motorboote auszuschliessen und um die Durchsetzung der Verordnung zu erleichtern, bestünde die Möglichkeit, die Motorenhöchstleistungen auf dem Rhein zu beschränken (z.B. 10 PS oder 6 PS), ähnlich der Regelung auf der aargauischen Limmat, wo nur Motoren bis zu 6 PS zugelassen werden. Die Motoren sollten allerdings eine Mindestleistung aufweisen, damit das Boot auch in der Flussströmung genügend manövrierfähig bleibt.

Minimale Uferabstände

Innerhalb der Flussbreiten von meistens mehr als 100 m sind Mindestabstände der Motorboote zum Ufer von 25 m einzuhalten. Das Landen und Wegfahren innerhalb der 25 m breiten Uferzone hat auf dem kürzesten Weg bei höchsten 5 km/h Fahrgeschwindigkeit zu erfolgen. Auf diese Weise erreichen die Motorbootswellen die Ufer abgeschwächt, und die hohen Turbulenzen der Antriebsschrauben können nicht auf die Ufer einwirken.

Reduktion der Motorbootszahlen

Nicht nur die Wellenhöhe, sondern auch die Wellenhäufigkeit hat einen fördernden Einfluss auf die Ufererosion. Durch geeignete Massnahmen ist dem Trend nach noch mehr Booten entgegenzuwirken. Im Hinblick auf die Erhaltung der natürlichen Ufer und auch zum Schutze befestigter Abschnitte ist ein kleinerer Motorbootsbestand anzustreben.

Entflechtung des Verkehrs

Damit die Verkehrssicherheit auch bei den reduzierten Höchstgeschwindigkeiten gewährleistet bleibt, ist in besonders gefährlichen Abschnitten eine Entflechtung zwischen der Kursschiffahrt einerseits und dem Bootsverkehr andererseits zu prüfen. Dies wäre mit entsprechender Signalisierung zu erreichen.

Verkehrsbeschränkungen bei Hochwasser

Bei hohen Wasserführungen sind die Ufer besonders gefährdet: Naturufer sind in oberen Bereichen oft steiler und deshalb empfindlicher auf Wellenschlag. Ein Ziel schonender Uferverbauungen liegt darin, die Oberkante der baulichen Sicherung so tief wie möglich anzusetzen, was bei höhern Wasserspiegellagen zu vermehrten Ausschwemmungen führen kann. Dieses Problem lässt sich entschärfen, wenn bei hohen Wasserführungen Sportmotorboote nicht mehr verkehren dürfen. Wird die Limite bei 700 m^3/s angesetzt, so bedeutet dies ein Motorbootsverbot während durchschnittlich 5 bis 10 Tagen im Jahr.

In diesen Hochwasserperioden wäre eine weitergehende Geschwindigkeitsreduktion der Kursschiffe sinnvoll, wenn sie sich aus Sicherheitsgründen verantworten liesse. Geschwindigkeitserhöhungen bei extremen Wasserständen, beispielsweise zur Kompensation von Umsteig-Zeitverlusten bei der Diessenhofer Brücke, sind unbedingt zu vermeiden.

Mit diesem Massnahmenpaket lässt sich der Wellenschlag auf die Ufer massgeblich verringern. Das Durchsetzen solcher einschränkender, teils unpopulärer Vorschriften stellt hohe Anforderungen an die zuständigen Organe der Seepolizei.

7.3 Bauliche und ingenieurbiologische Massnahmen (unter der Voraussetzung, dass die organisatorischen Massnahmen getroffen werden)

Ohne bauliche Eingriffe zur Reparatur besonders gefährdeter Uferpartien kann die Ufererosion nicht aufgehalten werden. Dies auch dann, wenn das organisatorische Massnahmenpaket vollständig ausgeschöpft wird. Sollen die Rheinufer in ihrem Charakter nicht weiter zerstört werden, so sind bei Ufersanierungen naturnahe und sanfte Verbauungsarten zu wählen, selbstverständlich mit Ausnahme der erforderlichen massiveren Bauweisen bei den Quaianlagen und Schiffslandestellen. Vielfach genügen einfache Sicherungsarbeiten im Sinne des Uferunterhaltes. Damit der natürliche Fluss nicht mit der Zeit zum Kanal wird, sind bei der Projektierung von Verbauungen einige Kriterien zu beachten:

Natürliche Flüsse zeichnen sich durch Abwechslung, Vielfalt, Unregelmässigkeiten und das Fehlen exakter geometrischer Formen aus. Konkret heisst dies, dass die Uferlinie mit Buchten und Vorsprüngen (z.B. Buhnen) durchsetzt sein darf. Die Neigung der Uferböschungen variiert; an Gleithängen ist die Böschungsneigung von Natur aus geringer als an Prallhängen. Scharfe Böschungsoberkanten sind nicht erwünscht. Tote und lebende Baumaterialien ergänzen sich sinnvoll. Im unteren, dem Wellenangriff ausgesetzten Teil der Böschungen von besonders exponierten Uferstrecken ist ein dauerhafter Bestand des Ufers nur durch den Schutz mit grösseren Natursteinen gewährleistet. Je steiler das Ufer und je stärker die Wellenangriffe, desto gröber muss das Verbauungsmaterial gewählt werden. Unter der heutigen Wellenbeanspruchung sind selbst flache Ufer bei feinkörnigem Grund nicht stabil. Verbauungen aus Steinen und Blöcken halten dem Wellenschlag stand, wenn bei der Schüttung des Untergrundes die Filterkriterien befolgt wurden, sei es durch den aufwendigen Einbau der erforderlichen Filterschichten oder durch die Verwendung geeigneter Gewebematten. Ausserdem ist die Verbauung (Blocksatz, Blockwurf oder Rollierung) ausreichend tief in die feinere Flusssohle einzubinden (Vorgrund). Oberhalb des Pegels, der einem Rheinabfluss von 600 bis 800 m^3/s entspricht, ist die Lebendverbauung vorzuziehen. Die Weide als Pionierpflanze eignet sich dafür vorzüglich. Die Bodenoberfläche sollte allerdings in diesem Bereich mit einer Schroppenlage abgedeckt sein, denn Humusierungen allein halten sich dort auf die Dauer kaum. An der Verbauungsstrecke am linken Rheinufer oberhalb Schupfen konnten diesbezüglich gute Erfahrungen gesammelt wer-

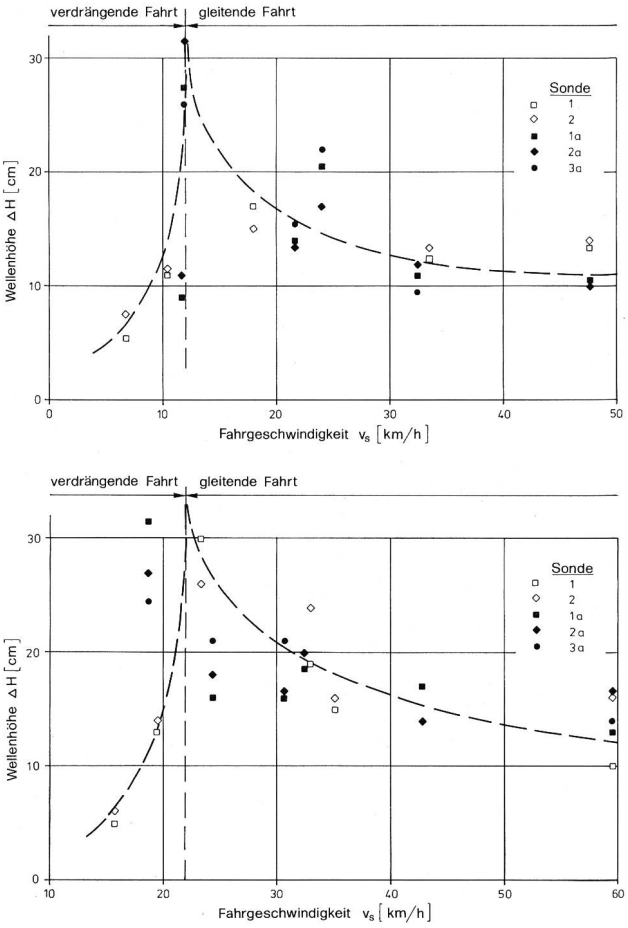


Bild 10. Wellenhöhen in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit des Polizeibootes TG 4; oben: Bergfahrten, unten: Talfahrten.

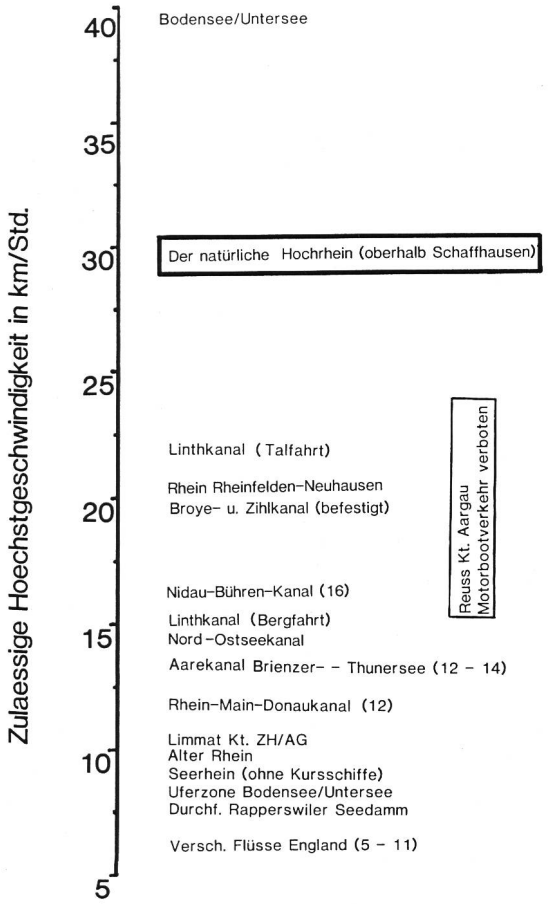


Bild 11. Vergleich der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten in verschiedenen Gewässern.

den. Neben den Weiden gibt es eine Anzahl anderer Ufergehölze, mit deren Ansiedlung das vorerst monotone Weidenufer in einer späteren Bepflanzungsphase belebt werden soll.

Die anzustrebende naturnahe Bauweise erfordert eine sorgfältige und detaillierte Projektierung und eine kundige und einfühlsame Baubegleitung. Einheitsnormalprofile über längere Uferstrecken liegen nicht im Sinne einer naturnahen Flusslandschaft. Der grössere Aufwand für Projekt und Baubegleitung gegenüber dem konventionellen Vorgehen kann allerdings kompensiert werden, indem bei der Bauausführung auf Perfektion und unnötigen Aufwand verzichtet wird. Vorsorglicher Unterhalt und angepasste, tendenziell leichtere Verbauungen dienen der Erhaltung der Flusslandschaft besser und sind weniger kostspielig als ein überdimensionierter Uferschutz, der durch seine massiven Bauelemente ins Auge sticht.

Adressen der Verfasser: Dr. *Andreas Huber,* Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH, CH-8092 Zürich, und Dr. *Heinz W. Weiss,* Basler und Hofmann, Ingenieure und Planer, Forchstrasse 395, CH-8029 Zürich.

Projektbegleitung: Dr. *Alex Lässker* und *Urs Fröhlich,* Amt für Umweltschutz und Wasserwirtschaft des Kantons Thurgau, CH-8500 Frauenfeld.

Literatur: *Gesamtbericht «Wellenerosion am Rhein»,* VAW-Mitteilung Nr. 88, Zürich 1986, 248 Seiten.

Erfahrungen beim Brunnenbau

Karl Heinrich Meyer

1. Allgemeines

Die ausführende Unternehmung wie auch der projektierende Ingenieur werden bei der Erstellung jedes neuen Brunnens immer wieder vor neue, oft schwierige Aufgaben gestellt.

Die Ursachen solcher Schwierigkeiten können verschiedener Natur sein. Ob hydraulisch, bodenmechanisch, bohrtechnisch oder chemisch bedingt, immer wird es dabei darauf hinauslaufen, dass im richtigen Zeitpunkt die richtige Entscheidung getroffen wird. Die Bodenstruktur, in der deutschen Brunnenbauersprache das «Gebirge», ist ein heikles, komplexes Gebilde, das bei unsachgemässer Behandlung irreversible Schäden davontragen kann, die sich auf eine langjährige Nutzung des Grundwasserträgers auswirken können.

Es ist zu unterscheiden zwischen Leistungsbrunnen und nur kurzzeitig wirkenden Fassungen für Wasserhaltungen von Baugruben.

Nicht jede Bauunternehmung verfügt über den erforderlichen, manchmal entscheidenden Erfahrungsschatz für den Bau von Leistungsbrunnen. Es ist Aufgabe des beratenden Ingenieurs oder Ingenieurgeologen, die richtige Auswahl an ausgewiesenen Unternehmungen zu treffen, um bereits im Offertstadium klare Voraussetzungen zu schaffen. Nachstehende Anregungen aus der Praxis entstammen der Erfahrung von zahlreichen Brunnenbaustellen im In- und Ausland, bei denen zum Teil heikle Entscheidungen zu fällen waren.

Manchmal konnte nur ein schrittweises Vorgehen den Erfolg sicherstellen. In allen Fällen handelt es sich um Leistungsbrunnen, für die eine möglichst lange «Lebensdauer» angestrebt wird, nicht aber um Brunnen für die Wasserhaltung von Baugruben und dergleichen. Die Böden, in denen die Vertikal- und Horizontalfilterbrunnen für sehr unterschiedliche Entnahmemengen projektiert und gebaut wurden, waren sehr verschiedenartig.

2. Auswahl der Bohrunternehmungen

Der Maschinenpark einer Bauunternehmung allein ist nicht massgebend für einen erfolgreichen Bau von Leistungsbrunnen. Viele Unternehmungen setzen Pfahlbohrmaschinen ein. Diese eignen sich ohne weiteres zum Bohren von Brunnen bis zu einem gewissen Durchmesser. Zum Gerät gehört aber ein erfahrener Maschinist sowie ein gut ausgewiesener Bohrmeister, dem Qualität vor Quantität geht. Diese Forderung ist unter dem heutigen Konkurrenzdruck oft sehr schwer aufrechtzuerhalten, denn die Arbeitsvergebung stützt sich fast immer auf öffentliche oder beschränkte Wettbewerbe. Die letztlich entscheidenden Gremien der Bauherrschaft sind gezwungen, auf die billigeren Offertsteller zu tendieren. Gerade in diesem Stadium kommt dem beratenden Ingenieur eine grosse Verantwortung zu.

Bis zu einem gewissen Grad lassen sich unerwünschte Billigofferten durch einen geeigneten Aufbau der Offerte abfangen. Schwieriger wird es, wenn sich lokale Unternehmungen neben örtlichen politischen Vorteilen auf ihre ausführungstechnischen Erfahrungen berufen, die sie bereits früher in den zu durchfahrenden Böden sammeln konnten. Dem beratenden Ingenieur wird es dabei meist schwerfallen, solche Vorteile für seine Zwecke zu bewerten und eine gewisse Routine der Unternehmung von früheren Brunnenbaustellen her bei der Vergabe als mitentscheidend zu werten oder sie zu entkräften.