

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Willamowski, Björn

Anwendung hydraulischer und fahrdynamischer Bewertungskriterien zur Beurteilung der Befahrbarkeit von Flüssen am Beispiel der Unteren Saale

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102689>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Willamowski, Björn (2000): Anwendung hydraulischer und fahrdynamischer Bewertungskriterien zur Beurteilung der Befahrbarkeit von Flüssen am Beispiel der Unteren Saale. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 82. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 51-55.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Anwendung hydraulischer und fahrdynamischer Bewertungskriterien zur Beurteilung der Befahrbarkeit von Flüssen am Beispiel der Unteren Saale

DIPL.-ING. BJÖRN WILLAMOWSKI, BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU

Die schiffbaren Flüsse und Kanäle werden vielseitig genutzt. Sie unterliegen ständigen Veränderungen sowohl infolge von natürlichen Prozessen als auch durch anthropogene Einflüsse.

Die Konkurrenz der verschiedenen Verkehrsträger untereinander zwingt die Binnenschifffahrt dazu, ihre Flotte den Bedürfnissen der Kunden immer besser anzupassen. Die Schiffe werden moderner, größer und stärker motorisiert. Ein erheblicher ökonomischer Faktor ist die optimale Auslastung der Fahrzeuge, ein Teil davon wiederum die mögliche Abladetiefe. Es besteht ein sich stetig veränderndes Spannungsfeld zwischen Schiff und Wasserstraße.

Soll die Befahrbarkeit eines natürlichen und durchströmten Flusses beurteilt werden, so sind viele Zusammenhänge zu untersuchen. Eine grobe Übersicht des komplexen Systems ist im Bild 1 gegeben.

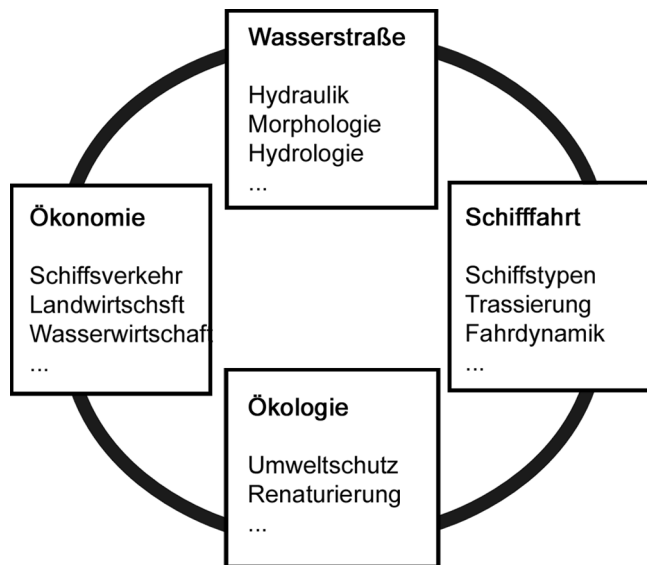


Bild 1: Zusammenhänge bei der Befahrbarkeitsanalyse

Ändert sich eine der Randbedingungen, sind oftmals Auswirkungen auf alle anderen Bereiche zu erwarten.

Aus diesem Komplex wird hier ein Teil herausgegriffen und vorgestellt. Es handelt sich dabei um einen Aspekt der Interaktion Schiff-Wasserstraße. Am Beispiel der freifließenden Unteren Saale wird die hydraulische Bewertung der Befahrbarkeit eines Flusses erläutert.

Als Kriterien für die Befahrbarkeit sind dabei die folgenden Größen von Bedeutung:

- Gewässerbreite
- Krümmungsradien
- Wassertiefe
- Fließgeschwindigkeit
- Abflussquerschnitt
- Beschaffenheit der Sohle
- Schiffstyp
- Hauptabmessung der Schiffe
- Antriebsleistung
- Verkehrsregelung
- Navigatorische Erfahrungen

Diese grundlegenden Angaben zur Wasserstraße und zur Schifffahrt bestimmen die zugelassene Schiffsgröße, die Lage der Fahrrinne, die fahrbare Geschwindigkeit und die Abladetiefe. Die daraus resultierenden hydraulischen Belastungen definieren u.a. den Umfang der Sohl- und Böschungssicherung, den Unterhaltungsaufwand und auch die Auswirkungen auf das ökologische System.

Die Saalestrecke II (Untere Saale) ist der enge, kurvenreiche, frei fließende Abschnitt vor der Mündung in die Elbe (Bild 2). Sie reicht von der Schleuse Calbe (SI-km 20) bis zur Mündung (SI-km 0). Der Streichlinienabstand (Normalbreite bei MW) wurde 1985 auf $b_{st} = 56,5$ m festgelegt. Der mittlere Abfluss beträgt $Q = 115$ m³/s. Die engsten Krümmungsradien liegen bei $R = 220...250$ m. Im Bereich des Trabitzer Bogens (SI-km 14-17) wird die Schifffahrt durch zwei Felsenstrecken mit entsprechendem Steilgefälle im Wasserspiegel beeinträchtigt. Die Tiefe in der Fahrrinne ist extrem abflussabhängig. Auf Grund der Gegebenheiten ist die Schifffahrt auf der Untere Saale nur eingeschränkt möglich. Schiffe mit einer Länge $L > 67$ m dürfen die Saalestrecke II einschiffen. Motorgüterschiffe deren Hauptabmessungen ($L \times B$) $85 \times 9,50$ m überschreiten und Schubverbände mit $L \times B > 100 \times 9,50$ m benötigen eine besondere Genehmigung (Sondertransporte).

Die traditionell im Industriedreieck Halle-Leipzig-Bitterfeld angesiedelte Chemie- und Baustoffindustrie würde die Wasserstraße Saale für Transporte nutzen, wenn in der Saalestrecke II eine bessere Fahrrentiefe vorhanden wäre [1]. Seitens der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung wird deshalb ein Ausbau der Unteren Saale beabsichtigt. Um der Binnenschifffahrt jedoch kurzfristig größere Abladetiefen anbieten zu können, wurden Zuschusswasserabgaben über das Wehr Calbe untersucht. Für einen Zeitraum von 1,5 bis 2 Stunden kann mit dieser Methode die Fahrrentiefe in den entscheidenden Felsenstrecken um etwa 20 cm verbessert werden.

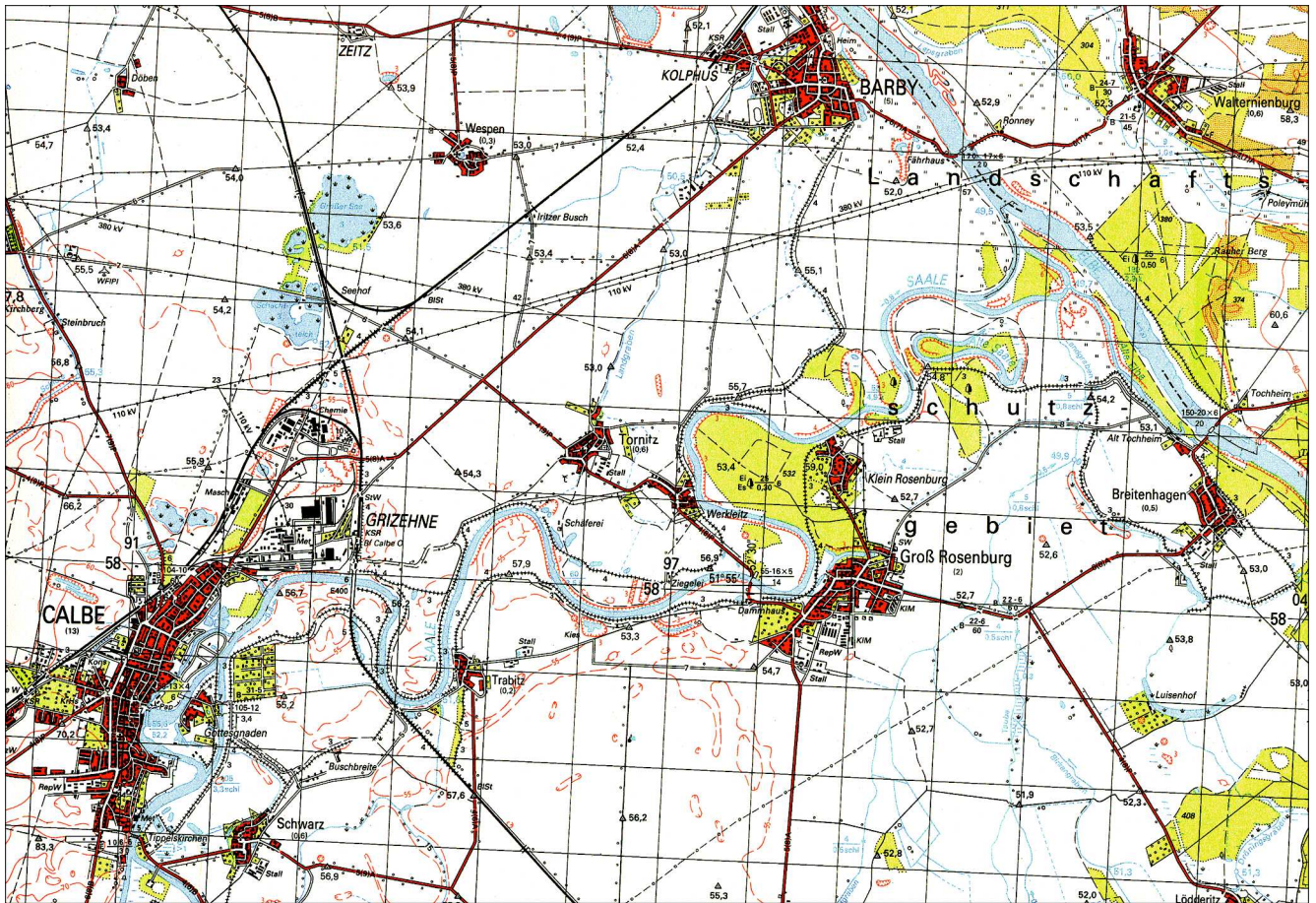


Bild 2: Übersichtsplan der Saale zwischen Calbe und der Mündung

Um den tatsächlichen Nutzen für die Schifffahrt aus dieser lokalen Wasserspiegelanhebung zu ermitteln, musste zuerst analysiert werden, worin die eigentlichen Behinderungen bestehen.

Die Fragen, die in diesem Zusammenhang zu beantworten waren, lauten:

- Welcher Art sind die Schwierigkeiten für die Schifffahrt im Flussabschnitt,

- können sie durch eine Zuschusswasserabgabe gemindert oder beseitigt werden?

Das Bild 3 zeigt die Verhältnisse in der Fahrrinne bei einem mittleren Niedrigwasserabfluss von $Q = 55 \text{ m}^3/\text{s}$. Im Wasserspiegellagenverlauf sind die Steilgefälle unterhalb der Felsen bei Trabit (SI-km 15,0) und Steinflüge (SI-km 16,8) zu erkennen. Die mittlere Sohlenlage in der Fahrrinne ist als gepunktete Linie dargestellt. Wichtig ist der jeweils höchste Punkt der Sohlenlage in

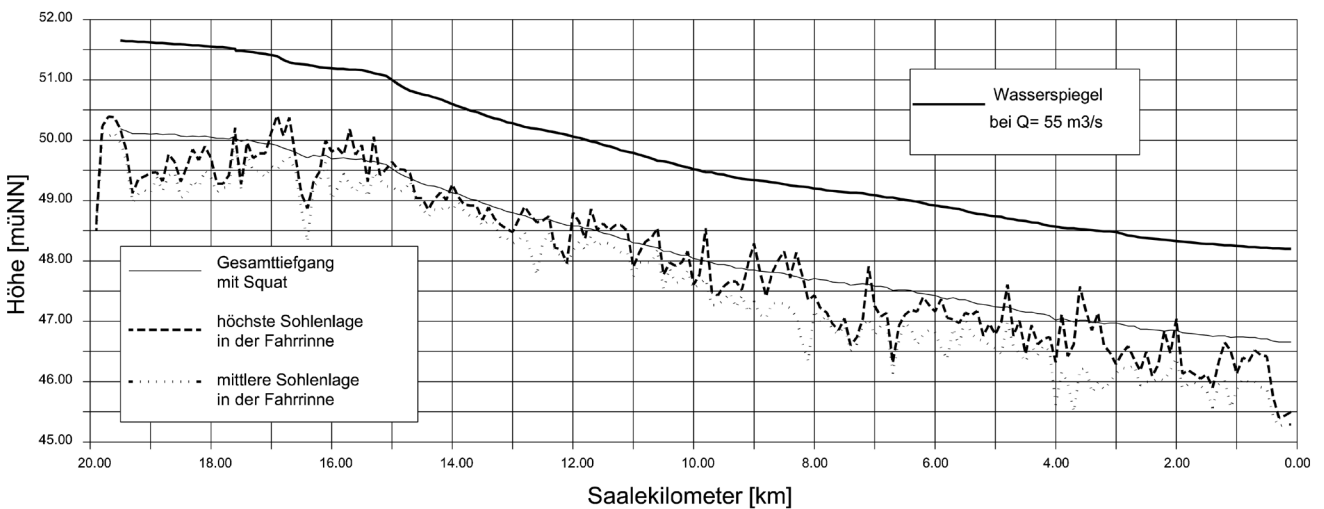


Bild 3: Wasserspiegel- und Sohlenlagen zwischen Calbe und Mündung

der Fahrrinne (dicke, gestrichelte Linie). Die Fehltiefen sind entlang der Saalestrecke II gleichmäßig verteilt. Es handelt sich dabei überwiegend um Innenuferbereiche in Krümmungen mit entsprechenden Anlandungen. Sie stellen, wie die Schifffahrt auf Grund der disziplinierten Fahrweise auf der engen Saale beweist, keine besondere Behinderung dar. Es ist zu erkennen, dass der durch die Schifffahrt eindeutig als Problemstelle beschriebene Bereich des Trabitzer Felsens in Bezug auf die Lage der Sohle nicht besonders auffällt. Allerdings steht hier felsiges Material an, was die Schiffsführer zu größerer Vorsicht zwingt. Als dünne, durchgezogene Linie ist der Gesamttiefgang (Tiefgang in Ruhelage zuzüglich der berechneten Bugtauchung bei kritischer Schiffsgeschwindigkeit) eines mit $T=1,20$ m abgeladenen Bergfahrers unter dem Wasserspiegel dargestellt. Die Methode der Beurteilung der Befahrbarkeit eines Flusses kann am Beispiel dieses zu Berg fahrenden Schiffes gut verdeutlicht werden.

Der Bergfahrer hatte eine Länge $L = 67$ m, eine Breite $B = 8,20$ m und einen Tiefgang $T = 1,20$ m. Die amtliche Fahrrinnetiefe betrug $h_{\text{Fahrrinne}} = 1,27$ m.

Nach der Berechnung der geometrischen und hydraulischen Parameter des Flussabschnittes sind die fahrdynamischen Größen im Zusammenhang mit dem bergfahrenden Schiff ermittelt worden. Zuerst wurde die dynamische Tiefertauchung von Bug und Heck nach dem Verfahren von RÖMISCH für die kritische Schiffsgeschwindigkeit berechnet. Das völlige Binnenschiff vertrimmt buglastig.

Fährt ein Schiff in einem allseitig begrenzten Fahrwasser, so muss das durch den eingetauchten Schiffskörper verdrängte Wasser hinter dem Schiff wieder ersetzt werden. Zwischen Bug und Heck baut sich ein Wasserspiegelgefälle auf, durch das eine Ausgleichsströmung entsteht (Rückstrom), die das Wasser entlang des Schiffskörpers nach hinten abführt. Die Rückstromgeschwindigkeit ist vom verbleibenden Abflussquerschnitt und der Schiffsgeschwindigkeit abhängig. Gegenüber einem geschleppten Fahrzeug wird die Rückströmung beim Binnenschiff durch die Propulsionsströmung beeinflusst. Im Falle von unterkritischer Schiffsgeschwindigkeit (hier vorausgesetzt) wird das Wasser strömend am und unter dem Schiff abfließen. Entsprechend der damit geltenden BERNOULLI- und Kontinuitätsgleichung entsteht neben dem Schiff durch die hohe Rückstromgeschwindigkeit ein Wasserspiegelabsenk (Δh). In diesem Wasserspiegelabsenk liegt ein Teil der dynamischen Tiefertauchung des Schiffes begründet. Die Schiffsformparameter und eine strömungsbedingte Veränderung der Druckverteilung stellen einen weiteren Anteil dar [3].

Es gilt für die kritische Schiffsgeschwindigkeit im Kanalfall unter Berücksichtigung der Propulsionsströmung und bei mittlerer Fahrt [2] [3] [5]:

$$V_{krp} = c_p \cdot C^* \cdot \sqrt{g \cdot h_m} \quad [\text{m/s}] \quad (1)$$

mit:

- V_{krp} = kritische Schiffsgeschwindigkeit mit Propulsionseinfluss bei mittlerer Fahrt [m/s]
- c_p = Propulsionsbeiwert [-]
- C^* = Beiwert = $f(n)$ [-]
- n = Querschnittsverhältnis (A_M/A_S) [-]
- A_M = ungestörter Profilquerschnitt [m²]
- A_S = eingetauchter Hauptspantquerschnitt ($B \times T$) [m²]
- B = Schiffsbreite [m]
- T = Schiffstiefgang [m]
- g = Gravitationskonstante [m/s²]
- h_m = rechnerische mittlere Wassertiefe (A_M/b_{ws}) [m]
- b_{ws} = Wasserspiegelbreite [m]

$$\Delta T_{B,H} = C_{F(B,H)} \cdot C_V \cdot 0,155 \sqrt{\frac{h}{T}} T \quad [\text{m}] \quad (2)$$

Für die dynamische Tauchung für Bug und Heck gilt der für die Kanal- und Flachwasserfahrt anwendbare Ansatz nach RÖMISCH [2][3]:

mit:

- $\Delta T_{B,H}$ = dynamische Tiefertauchung (Bug und Heck) [m]
- $C_{F,B}$ = Formbeiwert für Bugtauchung ($C_{F,B} = f(L/B)$; C_B) [-]
- $C_{F,H}$ = Formbeiwert für Hecktauchung ($C_{F,H} = 1$) [-]
- C_V = Geschwindigkeitsbeiwert [-]
- h = Wassertiefe in der Fahrrinne [m]
- L = Schiffslänge [m]
- B = Schiffsbreite [m]
- T = Schiffstiefgang [m]
- C_B = Blockkoeffizient [-]

Die zuvor genannten Erscheinungen treten schon bei der Kanalfahrt durch stehendes Wasser auf. Bei der Bergfahrt auf einem natürlichen Fluss überlagern sie sich außerdem mit der Strömungsgeschwindigkeit des Flusses in der Fahrrinne.

Das o.g. zu Berg fahrende Schiff hatte mit seiner äußerst knapp bemessenen Tiefgangsreserve ($h_{\text{Fahrrinne}} - T = 1,27 - 1,20 = 7$ cm) den Flussabschnitt direkt unterhalb des Trabitzer Felsens erreicht. Dort kam es nicht mehr von der Stelle. Der Schiffsführer konnte seine vorhandene Antriebsleistung nicht voll aktivieren, weil er durch den sofort einsetzenden dynamischen Absenk ("Ansaugeffekt", auch verbunden mit dem Loslösen von größeren Steinen aus der Sohle) Schäden am Schiffsboden und der Schraube befürchtete.

Diese Situation wird im Bild 4 deutlich. In der Grafik stellt die obere, durchgezogene Kurve die wirtschaftliche Schiffsgeschwindigkeit [km/h] dar. In der Regel wird diese mit 90 % der kritischen Schiffsgeschwindigkeit an-

Fall: $Q = 55 \text{ m}^3/\text{s}$ - vor Zuschusswasser

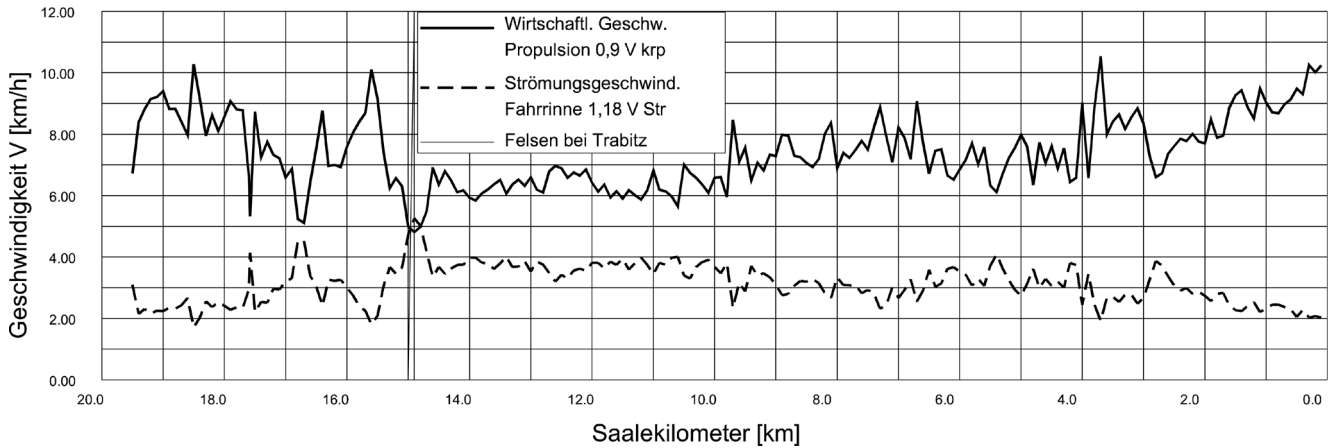


Bild 4: Situation vor der Zuschusswasserabgabe

genommen. Die untere Kurve zeigt die Strömungsgeschwindigkeit in der Fahrrinne [km/h]. Bei der Bergfahrt wirkt sie entgegen der Fahrtrichtung. Zwischen beiden Kurven lässt sich die mögliche Fahrt des Schiffes über Grund ablesen (siehe auch [4]). Es ist zu erkennen, dass die Schiffsgeschwindigkeit nicht hoch genug ist, um die Strömungsgeschwindigkeit im Felsenbereich zu überwinden.

Im Beispielfall wurde beschlossen, über das Wehr Calbe Zuschusswasser abzugeben, um dem Schiff die Weiterfahrt zu ermöglichen. Mit einer Wehrabsenkung über einen Zeitraum von ca. drei Stunden wurde eine Zuschusswasserabgabe durchgeführt, die es dem Binnenschiff ermöglichte, die Steilgefälle- und Felsenstrecke mit eigener Kraft zu überwinden. Die Kurven im Bild 5 entsprechen denen im Bild 4. Die Passage des Felsenabschnittes war trotzdem nur mit extrem kleiner Geschwindigkeit möglich.

Die Untersuchung zeigte, dass die durch die Schifffahrt immer wieder genannte Problemstelle am Trabitzen Felsen auch analytisch nachzuweisen war. Die Behinderung für die bergfahrende Schifffahrt ergibt sich aus der Kombination von:

- geringer Fließfläche mit geringer fahrbarer Geschwindigkeit
- Steilgefälle und hoher Strömungsgeschwindigkeit
- einer geringen Wassertiefe und speziell an dieser Stelle felsigem Untergrund

Es wurde deutlich, dass eine derartige differenzierte Betrachtung notwendig ist, um die flussbaulichen Untersuchungen zu ergänzen. Die Wechselwirkung zwischen Binnenschiff und begrenztem Fahrwasser ist unverzichtbarer Bestandteil einer ganzheitlichen Systemanalyse.

Fall: $Q = 70 \text{ m}^3/\text{s}$ - mit Zuschusswasser

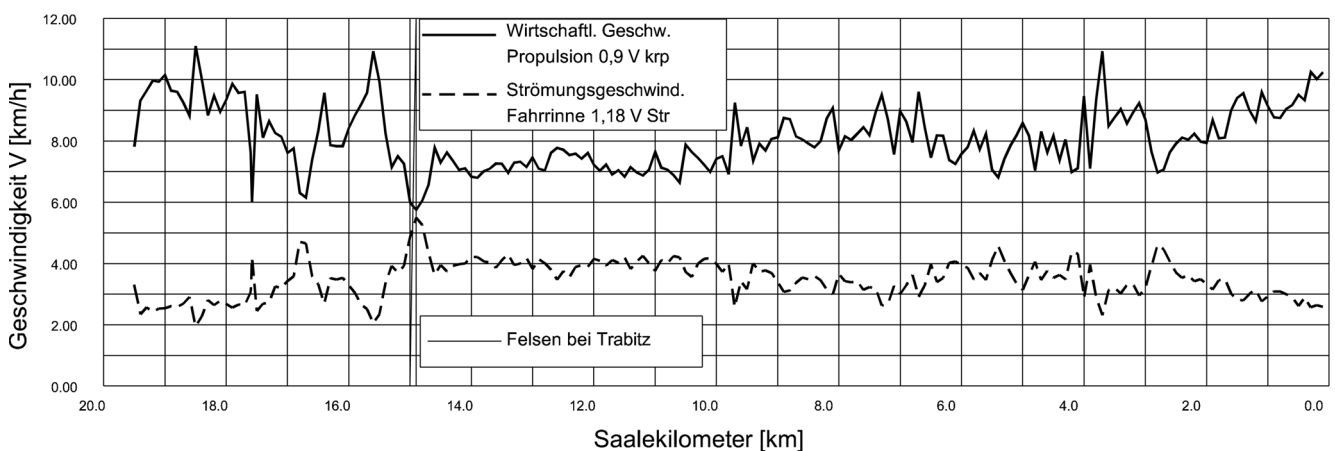


Bild 5: Situation während der Zuschusswasserabgabe

Literatur

- [1] Verein zur Hebung der Saaleschiffahrt e.V.: Verkehrsweg für Wirtschaft und Umwelt - Vollendung des Ausbaus – Warum? Halle (Saale), Dezember 1997
- [2] Römisch, K.: Der „Squat“ im begrenzten Fahrwasser – Betrachtungen aus hydromechanischer Sicht. Schiff & Hafen/Seewirtschaft, Heft 10/1993
- [3] Römisch, K.: Erreichbare Fahrgeschwindigkeit und Tauchung eines Schiffes auf flachem Wasser - ein Beitrag zur optimalen Bemessung von Binnen- und Seewasserstraßen. Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schiffahrt, Wasser- und Grundbau, Berlin. Schriftenreihe Wasser- und Grundbau, Heft 24, Berlin 1969
- [4] BAW: Vorträge zum BAW-Kolloquium „Flussbauliche Untersuchungen“ zur Stabilisierung der Erosionsstrecke der Elbe am 9. März 1995 in Berlin. Mitteilungsblatt der BAW Nr. 74, März 1996
- [5] Fuehrer, M.: Untersuchungen zur hydraulischen Beanspruchung der Wasserstraßen durch die Schiffahrt. Mitteilungsblatt der BAW Nr. 77, Mai 1998