

**Hamburg – die Elbe
und das Wasser**

**sowie weitere
wasserhistorische Beiträge**

herausgegeben im Auftrag der



von Christoph Ohlig

Siegburg 2009

Schriften der Deutschen Wasserhistorischen Gesellschaft
(DWhG) e. V.

Band 13

Alle Rechte liegen bei der DWhG / © Copyright DWhG

Homepage der DWhG: <http://www.dwhg-ev.de>
<http://www.dwhg.org>

Herstellung und Verlag: Books on Demand GmbH, Norderstedt, Deutschland

ISBN 978-3-8370-2347-3

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten
sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar

INHALTSVERZEICHNIS

	Zu diesem Band	III
Hamburg – die Elbe und das Wasser		
Jörgen Bracker	Die vorindustriellen Entwicklungsphasen im Hamburger Hafen	1
Silvia Hartel	Die Wasserversorgung in Hamburg von 830 bis 1930	19
Thorsten Bölck	Der „Mühlen Canal“ – ein Tunnel von Hamburgs Binnenalster zum Bleichenfleet	41
Andreas Hüser	Archäologie und Wasserbau – Beispiele aus der Hamburger Bodendenkmalpflege	55
Sylvin Müller-Navarra	Sturmfluten in der Elbe und deren Vorhersage im Wandel der Zeiten	77
Klemens Uliczka	Seeschiffe auf Seeschiffahrtsstraßen am Beispiel der Unter- und Außenelbe	97
Helmut Faist	Die Entwicklung der Elbe mit ihren Nebenflüssen als Wasserstraßen	113
Heinrich Reincke	Stör-Fall Tideelbe? – Ein Fluss im Wandel	131
Weitere wasserhistorische Beiträge		
Michael Schütz	Die Wasserwirtschaft des Königreiches Saba: Der Große Damm von Marib im Jemen	139
Erich Haussel und Volker Kirschenlohr	Wiesenbewässerung in Oberfranken am Beispiel einer Anlage bei Baunach	157
Richard Reinisch	Die erste Wasserleitung des Stiftes Göttweig 1721	167
Richard Reinisch	Die (wiederentdeckte) Felszisterne von Stift Göttweig	177
Hartmut Wittenberg	Gezeitenmühlen in Portugal	185
Kai Wellbrock	Wasserwirtschaftliche Untersuchungen an der historischen Stecknitzfahrt. Nachweis einer Kammerschleuse für das Ende des 14. Jh. anhand eines dynamischen Abflussmodells	197
Autorenverzeichnis		V
Verzeichnis der bisher erschienenen Bände der Schriften der DWhG		VII

Wasserwirtschaftliche Untersuchungen an der historischen Stecknitzfahrt. Nachweis einer Kammerschleuse für das Ende des 14. Jh. anhand eines dynamischen Abflussmodells

Kai Wellbrock

Teil A – Auswertung historischer Quellen

1. Einführung

2. Historische Randbedingungen

- 2.1 Die Stecknitz
 - 2.1.1 Die Berkenthiner Schleuse
 - 2.1.2 Die beiden Donnerschleusen
 - 2.1.3 Die beiden Oberschleusen
- 2.2 Der Scheitelkanal
 - 2.2.1 Die Hahnenburger Schleusentreppe
 - 2.2.2 Die Hornbeker oder Grambeker Schleuse
 - 2.2.3 Die Zienburger Stauschleuse
- 2.3 Die Delvenau
 - 2.3.1 Die Seeburger Schleuse
 - 2.3.2 Die Siebeneichener Schleuse
 - 2.3.3 Die Büchener Schleuse
 - 2.3.4 Die Niebuhrschleuse
 - 2.3.5 Die Dückerschleuse oder Kronenschleuse
 - 2.3.6 Die Palmschleuse
 - 2.3.7 Die Frauweider- oder Hafenschleuse

3. Technische Randbedingungen

- 3.1 Die Schleusenanlagen
 - 3.1.1 Stauschleusen
 - 3.1.2 Kammerschleusen
 - 3.1.3 Wasserwirtschaftliche Betrachtungen der unterschiedlichen Schleusentypen
- 3.2 Die Schleusentore
 - 3.2.1 Das Tor mit Schleusenbaum
 - 3.2.2 Das Stemmtor
 - 3.2.3 Wasserwirtschaftliche Betrachtungen der unterschiedlichen Schleusentore
- 3.3 Schwall- und Sunkwellen infolge Schließungsvorgängen an den Stauschleusen
- 3.4 Schiffstypen und Querprofile

4. Hydrologische Randbedingungen

5. Betriebliche Aspekte

- 5.1 Dauer der Fahrt
- 5.2 Wasserstandsregelung bzw. Pegel

Teil B – Instationäre Simulation von Schleusungen an der Hahnenburger Schleusentreppe

6. Methode

- 6.1 Zieldefinition
- 6.2 Anforderungen an das numerische Modell

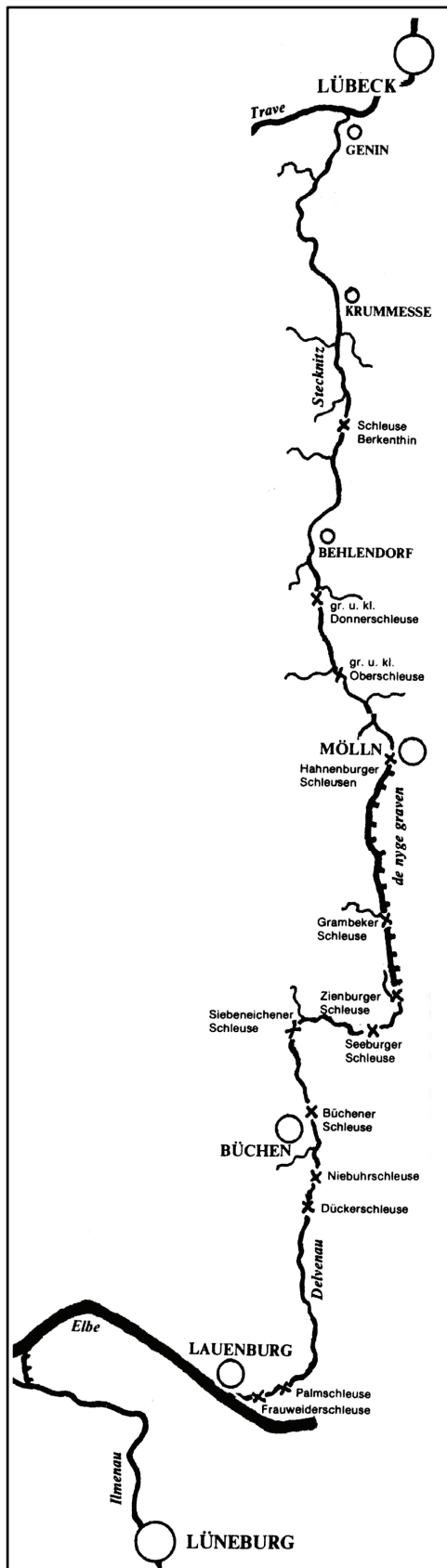
7. Definition einzelner Modellteile

- 7.1 Querprofile und Rauheiten
- 7.2 Schleusenöffnung
- 7.3 Spaltwasser und Zugabewasser
- 7.4 Der Möllner See
- 7.5 Zuflüsse
- 7.6 Zeitliche und räumliche Diskretisierung

8. Untersuchung unterschiedlicher Szenarien

- 8.1 Szenario 1: Hahnenburger Schleusentreppe um 1890
 - 8.1.1 Wasserbilanz
 - 8.1.2 Schleusungszyklen
 - 8.1.3 Simulationsergebnisse
 - a) Wassertiefen
 - b) Wasserbilanz
 - 8.1.4 Schlussfolgerungen (Szenario 1)
- 8.2 Szenario 2: Rekonstruierte Hahnenburger Schleusentreppe um 1400 mit Stauschleusen
 - 8.2.1 Schleusungszyklen
 - 8.2.2 Simulationsergebnisse
 - a) Wassertiefen
 - b) Wasserbilanz
 - c) Fließgeschwindigkeit und Sohl-schubspannung
 - d) Strömungskraft
 - 8.2.3 Schlussfolgerungen (Szenario 2)

9. Einordnung der Untersuchungsergebnisse in den historischen Kontext



Teil A – Auswertung historischer Quellen

1. Einführung

Spätestens seit dem 13. Jahrhundert wurde in der Lüneburger Heide großmaßstäblich Salz in Salinen gefördert. Dieses Salz nahm zunächst den Weg die Ilmenau hinab bis zur Elbe und wurde anschließend die Elbe stromaufwärts bis nach Lauenburg verschifft. Dort angekommen musste das Salz auf Pferdefuhrwerke verladen werden, um einen mühevollen Weg bis in das rund 50 km entfernte Mölln anzutreten. In Mölln konnte das Salz schließlich abermals auf Schiffe verladen werden, um die Stecknitz hinab bis nach Lübeck transportiert zu werden. In den großen Lübecker Salzspeichern zwischengelagert wurde das Salz schließlich im Hanseverbund über die gesamte Ostsee verschifft. Insbesondere in der südschwedischen Provinz Schonen war das Salz begehrt, um die dort in den Sommermonaten zahlreich gefangenen Heringe zu pökeln.

Da aus ökonomischer Sicht also ein schneller und einfacher Transport des Salzes zwischen Lüneburg und Lübeck wünschenswert war, einigten sich im Jahr 1390 der lauenburgische Herzog Erich IV. und die Hansestadt Lübeck auf die Einrichtung der sog. Stecknitzfahrt.¹ Als Stecknitzfahrt wird heute die gesamte schiffbare Verbindung zwischen Lauenburg und Lübeck bezeichnet. Sie setzte sich aus folgenden Abschnitten zusammen (vgl. Abb. 1):

Abb. 1: Verlauf der Stecknitzfahrt mit eingetragenen Schleusenstandorten (verändert aus: Müller 2002).

¹ vgl. Urkunde von 24. Juni 1390 – Vertrag zwischen der Hansestadt Lübeck und dem lauenburgischen Herzog Erich IV. zur Errichtung der Stecknitzfahrt (Archiv der Hansestadt Lübeck: Thesen Nr. 188 und 189, Urkundenbuch der Stadt Lübeck Nr. 4, Nr. 519 und 502 – vollständiger Vertragstext in Happach-Kasan 2002, 69-70).

Aus der *Delvenau*, welche bei Lauenburg in die Elbe mündet und etwa 12 km südlich von Mölln entspringt (Länge etwa 39 km). Vor 1398 war sie durch zwei Mühlen-dämme bei Büchen und bei Buchhorst (bzw. Lauenburg) abgesperrt, was eine Schifffahrt ausschloss.² Während des Betriebes der Stecknitzfahrt wurde der Verlauf der Delvenau mit einer Vielzahl von Windungen weitgehend beibehalten. Zur Ermöglichung der Schifffahrt wurden auf der Delvenau sieben Schleusenanlagen eingerichtet.

Aus der *Stecknitz*, welche ihren Ursprung im Möllner See hat und im Lübecker Stadtteil Genin in die Trave mündet (Länge etwa 39 km). Sie war mit einiger Sicherheit bereits vor dem Beginn der Stecknitzfahrt anhand mindestens einer Stauschleuse am Auslass aus dem Möllner See schiffbar.³ Wurde zunächst die Schifffahrt auf der Stecknitz durch lediglich vier Schleusen gewährleistet, erfolgte ab Mitte des 18. Jahrhunderts durch die Ergänzung der sog. Kleinen Donnerschleuse eine weitere Verbesserung.

Markantestes Merkmal der Stecknitzfahrt ist mit Sicherheit der *Scheitelkanal*, der die beiden zuvor erwähnten Flüsse verbindet und dabei die Wasserscheide zwischen Nord- und Ostsee durchsticht. Er wurde zwischen 1391 und 1398 gebaut (Länge etwa 12 km). Die Trasse verläuft relativ geradlinig vom Quellgebiet der Delvenau zum Möllner See. Am nördlichen Abschluss der Scheitelhaltung musste am Standort der sog. Hahnenburger Schleusentreppe auf einer Strecke von rund 450 m eine Höhendifferenz von etwa 4,50 m überwunden werden. Hierzu waren mit Sicherheit bereits zu Beginn zwei Schleusenanlagen angeordnet. Unklar ist, um welchen Schleusentyp es sich hierbei gehandelt hat. Für das ausgehende 19. Jahrhundert ist allerdings durch Rehder (1890) eine Konstellation mit zwei Kammerschleusen und einer Stauschleuse gut belegt. Den südlichen Abschluss der Scheitelhaltung bildete zunächst die Zienburger Stauschleuse. Mit dem Bau der Horn-

beker (oder: Grambeker) Stauschleuse (ab 1830 Kammerschleuse) wurde die Scheitelhaltung auf rund 8 km verkürzt.

Nach der Eröffnung der Stecknitzfahrt am 22. Juli 1398, als 30 Schiffe von Lauenburg in Lübeck ankamen⁴, war diese etwa 500 Jahre ohne wesentliche Änderungen im Betrieb und wurde erst durch den moderneren und größeren Elbe-Trave-Kanal (seit 1936: Elbe-Lübeck-Kanal) abgelöst.⁵ Dieser könnte insofern als Weiterentwicklung der Stecknitzfahrt angesehen werden, als dass er sich in weiten Teilen der historischen Trasse bedient. Leider hat dieser Umstand auch zur Folge, dass sich in heutiger Zeit nur noch wenige Relikte finden.⁶

Die Stecknitzfahrt und insbesondere der Scheitelkanal kann daher zu Recht als ein „würdiges Denkmal der Weisheit, des Unternehmungsgeistes und der Kraftfülle der Vorfahren im vierzehnten Jahrhundert“⁷ gelten, wie Woltmann bereits im frühen 19. Jahrhundert konstatierte.

Den Niedergang erlebte die Stecknitzfahrt etwa ab der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts. Zum einen wurde im Ostseeraum mittlerweile schottisches Salz zu günstigeren Preisen angeboten, als es die Lübecker Kaufleute konnten. Dies lag einerseits an dem mittlerweile nicht mehr zeitgemäßen technischen Standard der Stecknitzfahrt, welche nur verhältnismäßig kleine Schiffe zuließ. So wird etwa vermerkt, dass „der alte Kanallauf [...] wirklich übermäßig krumm“⁸ sei. Andererseits wurde der Warentransport auf der Stecknitzfahrt spätestens mit der Eröffnung der Lübeck-Büchener Eisenbahn 1851 und der Lübeck-Hamburger Eisenbahn 1862 zunehmend unrentabel.

⁴ Boehart et al. 1998, 7f.

⁵ Der Elbe-Trave-Kanal wurde ab 1896 auf einer Länge von etwa 62 km nach den Plänen des im Folgenden häufig zitierten Lübecker Baudirektors Peter Rehder nach zeitgemäßen Standards erbaut.

⁶ Eine ausführliche Zusammenstellung der erhaltenen Relikte enthält Goldammer 2002.

⁷ Woltmann 1826, 170.

⁸ Rehder 1892, 5.

² Rehder 1890, 572.

³ Müller 2002, 10.

In vorliegender Arbeit wird der Fragestellung nachgegangen, wie mit dem begrenzten Wasserdargebot – insbesondere im Scheitelkanal – ein möglichst kontinuierlicher Betrieb der Stecknitzfahrt aufrecht erhalten werden konnte. Hierzu zählt vor Allem eine Berechnung bzw. Abschätzung der Schwall- und Sunkwellen, die aus den Schleusungsvorgängen an den einfachen Stauschleusen resultieren. Diese lassen sich mit einem numerisch-instationären Modell berechnen. Im Folgenden werden daher zunächst alle maßgebenden Daten und Parameter für eine instationäre Berechnung der gesamten Stecknitzfahrt zusammengestellt. Hierzu zählen insbesondere:

- eine chronologische Zusammenstellung der Bauphasen aller Schleusenanlagen
- Querprofile und Längsschnitte aller (Gewässer-)Abschnitte
- Hydrologische Eingangsparameter (Abflussspenden, Größe und geomorphologische Eigenschaften der Einzugsgebiete, Pegel-daten)
- Betriebliche Angaben (Schleusungsvorgang, Dauer der Fahrt etc.)

Für die Zusammenstellung dieser Angaben erfolgt eine Auswertung und Gegenüberstellung historischer Quellen, um verschiedene Betriebsphasen aufzuzeigen, da für die Modellierung ein bestimmter Betriebszeitpunkt gewählt werden muss.

Aus dem 19. Jahrhundert liegen umfangreiche Abhandlungen von H. L. Behrens⁹, R. Woltmann¹⁰ und P. Rehder¹¹ über die Stecknitzfahrt vor, so dass über den Betrieb zu dieser Zeit ein gutes Bild skizziert werden kann. Schließlich findet sich in dem Entwurf zum Bau des Elbe-Trave-Kanals¹² eine Aufnahme der Stecknitzfahrt. Aus allen Quellen geht

⁹ Heinrich Ludwig Behrens (geb.1787, gest. 1839), Hamburg.

¹⁰ Reinhard Woltmann (geb. 1757, gest. 1837), Direktor der elbischen Strom- und Uferwerke, Hamburg.

¹¹ Peter Rehder (geb. 1843, gest. 1920), ab 1879 Wasserbauinspektor, ab 1888: Wasserbaudirektor, ab 1900: Oberbaudirektor der Hansestadt Lübeck. Leitete u. a. die zweite und dritte Travekorrektur, die Hafenerweiterungen 1887 und plante den Elbe-Trave-Kanal.

¹² Rehder 1892.

hervor, wie beschwerlich die Schifffahrt auf der Wasserstraße war und dass zu dieser Zeit ein dringender Verbesserungsbedarf des Wasserweges bestand. Mehrere Versuche dazu scheiterten an fehlenden technischen Möglichkeiten oder finanziellen Mitteln bzw. aufgrund von politischen Differenzen zwischen Lauenburg und Lübeck.

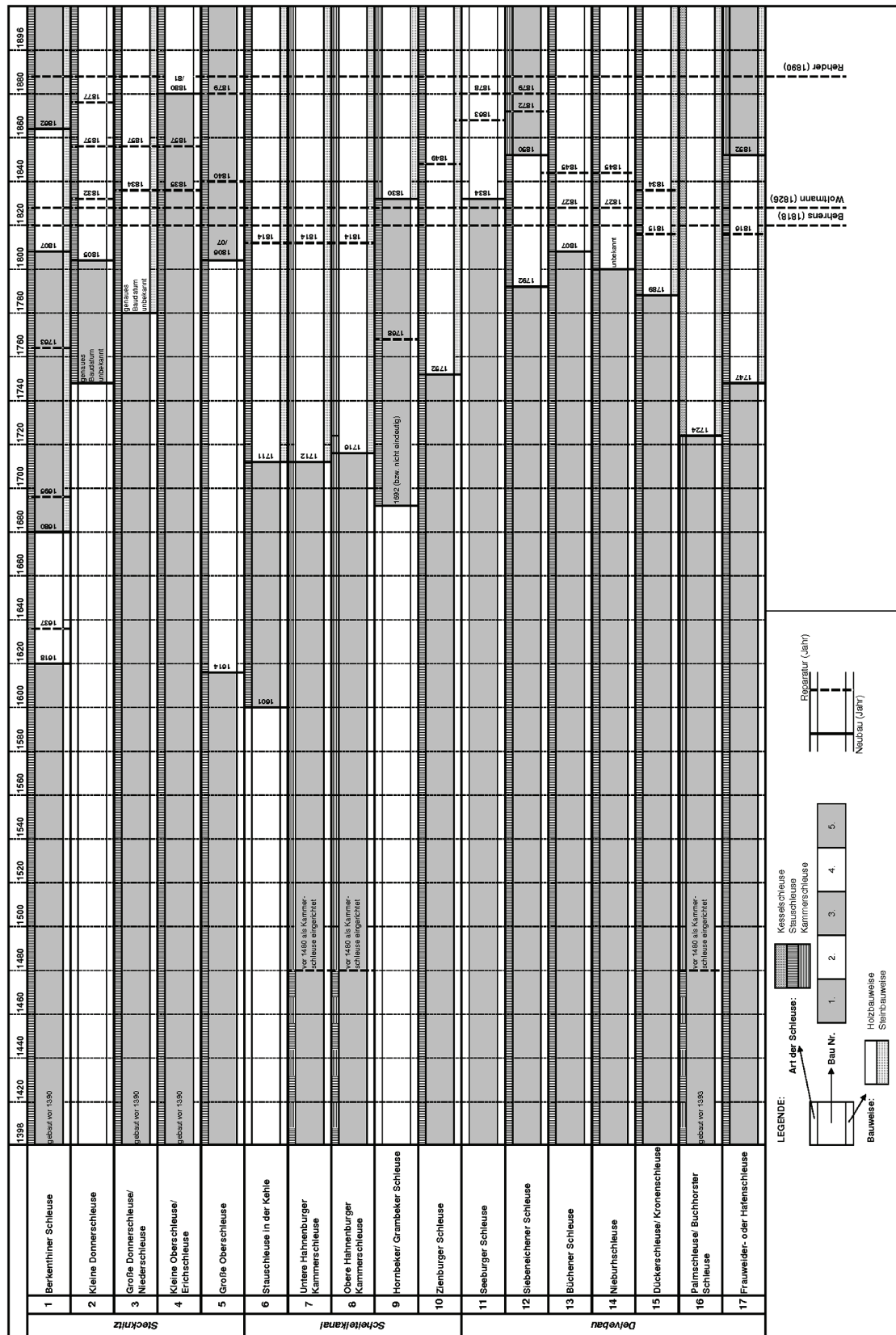
Als Schwerpunkt der Arbeit wird exemplarisch ein kritischer Kanalabschnitt mit einem instationären Berechnungsmodell abgebildet und die theoretischen Berechnungsergebnisse mit den historischen Angaben über den „alltäglichen“ Betrieb verglichen. Diese Angaben sind insbesondere für eine Kalibrierung des Berechnungsmodells erforderlich, da Wasserstands- oder Abflussmessungen nur im sehr begrenzten Umfang bzw. in einer für die Kalibrierung nicht ausreichenden Genauigkeit vorliegen.

In der historischen Forschung wird zum Teil kontrovers diskutiert, ob die beiden Hahnenburger Schleusen schon zu Beginn der Stecknitzfahrt 1398 als Kammerschleusen eingerichtet worden waren. Es wird daher anhand einer dynamischen Abflusssimulation geprüft, ob aus hydrologisch-hydraulischer Sicht zwingend Kammerschleusen erforderlich gewesen waren oder ob ein Betrieb mit den einfacheren Stauschleusen¹³ möglich gewesen wäre.

gegenüberliegende Seite:

Abb. 2: Chronologische Zusammenstellung der Bauphasen aller Schleusenanlagen im Verlauf der Stecknitzfahrt.

¹³ Im Weiteren werden zur klaren Unterscheidung die eintorigen Stauschleusen auch als *Wehre* bezeichnet, denn ihre Funktionsweise gleicht der eines beweglichen Wehres. Die zweitorigen Kammerschleusen werden vereinfacht als *Schleusen* benannt (vgl. Abs. 3.1).



2. Historische Randbedingungen

Nach dem Ausbau der Stecknitzfahrt 1398 bestanden in der Stecknitz zunächst vier und in der Delvenau sieben Schleusen.¹⁴ Hinzu kommen die zwei Hahnenburger Schleusenanlagen als nördlicher und die Zienburger Schleuse als südlicher Abschluss der Scheitelhaltung. Bei Inbetriebnahme bestanden somit zunächst 14 Schleusen.

Anhand der 1601 errichteten Stauschleuse an der Kehle im Bereich der sog. Hahnenburger Schleusentreppe wurde der Abstieg vom Scheitelkanal in den Möllner See erleichtert. Mit dem Bau der Hornbeker (oder: Grambeker) Schleuse wurde die Scheitelstrecke im späten 17. bzw. Mitte des 18. Jahrhunderts¹⁵ um etwa 3,3 km verkürzt und die endgültige Schleusenanzahl von 17 erreicht¹⁶ (vgl. Abb. 1).¹⁷

Abb. 2 zeigt eine chronologische Zusammenstellung¹⁸ der Bauphasen aller Schleusenanlagen. Insbesondere für die spätere Simulation unterschiedlicher Betriebszeitpunkte ist diese Aufstellung von Bedeutung, um eine tatsächlich vorhandene Konstellation abbilden zu können. Welche Schleusenanlagen bestanden zu welcher Zeit in welcher Form?

¹⁴ Im Verlauf der Stecknitz sind dieses (von Nord nach Süd): Berkenthiner Schleuse, Große Donnerschleuse, Kleine und Große Oberschleuse. Im Verlauf der Delvenau sind dieses (von Nord nach Süd): Seeburger, Sieben-eichener, Büchener, Niebuhr-, Dücker-, Palm- und Frauweiderschleuse.

¹⁵ Das genaue Errichtungsdatum des Hornbeker Wehres unterscheidet sich in verschiedenen historischen Quellen (vgl. Abs. 2.2.2).

¹⁶ Hierin ist die Kleine Donnerschleuse berücksichtigt, deren exaktes Baujahr nicht bekannt ist. Nach Müller ist es fraglich, ob die Kleine Donnerschleuse bereits zu Beginn der Stecknitzfahrt vorhanden war (Müller 2002, 26; vgl. auch Abs. 2.1.2).

¹⁷ In Abb. 1 sind lediglich 13 Schleusenstandorte eingetragen. Unter Berücksichtigung von jeweils zwei Schleusen am Standort der Donnerschleuse und der Oberschleuse sowie der drei Schleusenanlagen an der Hahnenburger Schleusentreppe ergibt sich die Endzahl von 17 Schleusen.

¹⁸ Diese Zusammenstellung beruht im Wesentlichen auf den Angaben von Rehder 1890 und Müller 2002.

2.1 Die Stecknitz

Die etwa 39 km lange Stecknitz war bereits vor Einrichtung der eigentlichen Stecknitzfahrt 1398 vom Möllner See bis zur Trave bei Lübeck schiffbar. In ihrem Verlauf bestanden folgende Stauschleusen:¹⁹

- Berkenthiner Schleuse
- Niederschleuse
(später: Große Donnerschleuse)
- Kleine Oberschleuse (später: Erichschleuse)

2.1.1 Die Berkenthiner Schleuse

Die Berkenthiner Schleuse existierte schon vor 1390, was aus dem Vertrag zur Errichtung der Stecknitzfahrt hervorgeht.²⁰ Dem Verlauf der Stecknitz aufwärts folgend war sie die erste Schleusenanlage. Bis ins 18. Jahrhundert gab es an diesem Standort insgesamt vier Ersatzneubauten und drei größere Reparaturen.²¹ 1680 wurde die zuvor hölzerne durch eine massive Stauschleuse ersetzt.²²

2.1.2 Die beiden Donnerschleusen

Bereits vor Inbetriebnahme der historischen Stecknitzfahrt bestand die Große Donnerschleuse unter der Bezeichnung Niederschleuse. Rund 190 m unterwasserseitig wurde später zu einem nicht bekannten Zeitpunkt die sog. Kleine Donnerschleuse erbaut.²³ Rehder geht davon aus, dass sie bereits seit 1398 vorhanden war.²⁴ Seitens Hogrewe wird angemerkt, dass sie „in neuerer Zeit zur Beförderung der Schifffahrt angelegt“²⁵ wurde, was

¹⁹ Müller 2002, 24; 26f.

²⁰ Müller 2002, 24f. und UBL 4, Nr. 519.

²¹ Rehder 1890, 577.

²² Hogrewe 1780, 39 und Müller 2002, 26.

²³ Zu den Gründen für die Anordnung einer zweiten Stauschleuse in geringem Abstand s. Abs. 3.1.3.

²⁴ Rehder 1890, 571ff. – Rehder nennt für die Stecknitzfahrt eine Gesamtanzahl von 15 Schleusen zum Zeitpunkt der Fertigstellung 1398. Explizit benennt er die späteren Neubauten der Stauschleuse an der Kehle und der Hornbeker (oder: Grambeker) Schleuse, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die Kleine Donnerschleuse bereits 1398 bestanden haben müsste.

²⁵ Hogrewe 1780, 39.

auf eine Bauzeit Mitte des 18. Jahrhunderts hinweist. Allerdings lässt sich seine Aussage auch in der Weise auslegen, dass an der Schleusenanlage eine Reparatur bzw. Instandsetzung zur Verbesserung der Schifffahrt durchgeführt wurde.

Die Kleine Donnerschleuse wurde im Jahr 1805 wiederum als hölzerne Stauschleuse an einem anderen Standort neu aufgebaut²⁶ und in den Jahren 1832, 1857 und 1877 erneuert. Die zuvor hölzerne Große Donnerschleuse ist im Jahr 1780 als massive Stauschleuse neu errichtet worden.²⁷ Größere Reparaturen werden für die Jahre 1834 und 1857 angegeben.²⁸

2.1.3 Die beiden Oberschleusen

Die Kleine Oberschleuse (auch Erichschleuse genannt) bestand bereits zur Zeit des Herzogs Erich I. (1296 bis 1361). Mit der Einrichtung der Stecknitzfahrt wurde dann etwa 420 m oberwasserseitig die ebenfalls hölzerne Große Oberschleuse errichtet.²⁹

Zwischen beiden mündete die Steinau³⁰, die aufgrund ihres Einzugsgebiets von etwa 83 km² Größe einen wesentlichen Einfluss auf die wasserwirtschaftliche Situation der Stecknitz gehabt haben dürfte.

Rehder gibt für 1881 den Neubau der Kleinen Oberschleuse an, nachdem sie bereits in den Jahren 1834 und 1857 repariert worden war. Die Große Oberschleuse sei in den Jahren 1614 und 1807 jeweils als hölzerne Stauschleuse neu aufgebaut worden. Größere In-

standsetzungen hat es in den Jahren 1840 und 1879 gegeben.³¹ Behrens bestätigt den Neubau der Großen Oberschleuse zu Beginn des 19. Jahrhunderts als hölzerne Stauschleuse.³² Gemeinsam hatten diese beiden dicht beieinander angeordneten Wehre eine ähnliche Funktion wie eine Kammerschleuse (vgl. Abs. 3.1). Zur Funktion der Kleinen Oberschleuse berichtet Behrens allerdings: „*Man gebraucht sie bloß um die Schiffe über die seichten Stellen zu führen.*“³³

Etwa 2 km oberhalb der Großen Donnerschleuse entspringt die Stecknitz aus dem Möllner See. Dieser hat infolge diverser Zuflüsse ein relativ großes Einzugsgebiet, so dass in der Stecknitz von einer verhältnismäßig großen Wasserführung ausgegangen werden kann.

2.2 Der Scheitelkanal

Der Scheitelkanal bestand, vom Möllner See kommend, aus der Hahnenburger Schleusentreppe und der neu errichteten Kanalstrecke, welche ihren südlichen Anschluss an den natürlichen Verlauf der Delvenau zunächst an der Zienburger Schleuse und später an der Hornbeker Schleuse hatte. Behrens vermerkt hierzu:

„*Die Strecke des Kanals zwischen Hahnenburger und Stauschleuse bildet den Behälter, woraus die beyden übrigen mit Wasser versehen werden,*“³⁴

Aufgrund der geringen Einzugsgebietsgröße der Scheitelhaltung und der damit verbundenen geringen Zuflüsse ist diese als besonders

²⁶ Behrens 1818, 10 f. geht davon aus, dass im Jahr 1805 ein Ersatzneubau der Kleinen Donnerschleuse an anderer Stelle erfolgte. Demnach müsste bereits zuvor eine hölzerne Stauschleuse existiert haben.

Um einen ungestörten Schiffsbetrieb zu gewährleisten, konnten Ersatzneubauten in eigens hierfür gegrabenen Umlaufkanälen errichtet werden, die erst nach Fertigstellung der eigentlichen Schleusenanlage an das Hauptgerinne angeschlossen wurden.

²⁷ Müller 2002, 26 und Hogrewe 1780, 39.

²⁸ Rehder 1890, 575.

²⁹ Müller 2002, 27 f.; s.a. Fußnote 23.

³⁰ In die Stecknitzfahrt mündeten zwei Gewässer, die den Namen Steinau haben. Zur Unterscheidung werden sie im Weiteren aufgrund ihrer Lage mit Steinau (Büchen) und Steinau (Nusse) benannt (vgl. auch Abs. 4 und Tab. 2).

³¹ Rehder 1890, 577.

³² Behrens 1818, 9 – Behrens schreibt, dass die Große Oberschleuse als hölzerne Stauschleuse „*vor wenigen Jahren erbaut*“ worden sei. Dieses entspricht somit den Angaben Rehders.

³³ Behrens 1818, 9.

³⁴ Behrens 1818, 3 – Der südliche Abschluss des Scheitelkanals in dieser Quelle gemeinhin als Stauschleuse bezeichnet, da die Hornbeker Stauschleuse erst 1830 als massive Kammerschleuse neu aufgebaut wurde (vgl. Abs. 2.2.2).

kritisch in Hinblick auf eine dauerhafte Aufrechterhaltung der Schifffahrt anzusehen. In den Entwürfen zum Bau des Elbe-Travekanals aus dem Jahr 1892 wird die Einzugsgebietsgröße mit lediglich 31,4 km² angegeben und die Scheitelhaltung werde nur durch Quellen gespeist.³⁵ Von Hogrewe wird hierzu allerdings angemerkt:

„Der Delvenau-Graben [der Scheitelkanal]³⁶, der die Stecknitz und Delvenau verbindet, und wegen der, dazwischen belegenen Höhen, an etlichen Stellen, 16, bis 17 Fuß tief ausgegraben ist, erstreckt sich von den Möllnschen See, bis an die Zienburger Stauschleuse, in einer Länge von 1 ¼ Meilen [etwa 9,2 km]. Er dienet zum Wasserbehälter der Schifffahrt, und erhält seinen nothdürftigen Zufluß aus dem Priester- und Hornbeker Bach, und einigen minder beträchtlichen Quellen.“³⁷

Hogrewe gibt demnach auch den Priesterbach (und den Hornbeker Bach³⁸) als Zulauf zum Scheitelkanal an. Diese These ist auch unter Berücksichtigung topografischer Gegebenheiten anzunehmen. Aus welchem Grund diese Zuflüsse zur Scheitelhaltung von Rehder nicht erwähnt werden, muss offen bleiben.

Am Ende des 17. Jahrhunderts wurde die Scheitelhaltung durch den Bau der Hornbeker Stauschleuse um etwa 3,2 km verkürzt. Aus betrieblicher Sicht ist diese Maßnahme allerdings als kritisch einzuschätzen. Ein kleineres speicherbares Volumen in der Scheitelhaltung (bedingt durch eine kürzere Haltungslänge) führt bei einer gleichen Wasserstandsdifferenz vor der Öffnung der Stauschleusen (vgl. Abs. 3.1.1) zu einem schnellerem Absinken des

Oberwasserpegels und einer flacheren Schwallwelle nach dem Öffnen der Wehre. Allerdings ist das Gesamtvolumen der Schleusungsverluste dann auch geringer. Die Dauer, bis die Verluste durch natürliche Zuflüsse ausgeglichen sind, reduziert sich. Dieses ist für den kontinuierlichen Betrieb der Schifffahrt, insbesondere während der niederschlagsarmen Sommerperiode, vorteilhaft.

Die Annahme, dass die Sohle in der Scheitelhaltung horizontal verlief, ist mit Blick auf eine Aussage von Behrens nicht richtig, denn es wird vermerkt:

„Die Oberfläche des Wasser steht in demselben [in der Scheitelhaltung] horizontal, im Grundbette befindet beym Dorfe Grambek sich ein Rücken der sich nach beiden Seiten um 4 Fuss [etwa 1,20 m] neigt. Ueber diesen Rücken bleiben beim Durchgange der Schiffe durch die Schleuse, der dem Verteilungspunct [gemeint ist die Scheitelhaltung] jedesmal 2 Millionen Cubickfuss [etwa 54.000 m³] Wasser kostet, nur 3 Zoll [ca. 8 cm] Wasser stehen, wodurch sie nicht selten aufgehalten werden. [...] Gewöhnlich veranlasst der Durchgang der Schiffe durch die Schleusen eine Erniedrigung seiner Oberfläche von 4 bis 5 Zoll [ca. 10 bis 13 cm], welcher Verlust durch die Zuflüsse aus dem Hornebeker und Alt-Möllnschen Mühlenbach, so wie aus den Moor und Bergquellen in 72 bis 80 Stunden ersetzt wird. Das Wasser aus dem Bache von Alt-Mölln, das sehr viel zu seiner Füllung beiträgt, ist ihm jedoch von Maitag bis Martini [der Martinstag, jedes Jahr am 11. November] genommen, weil der Müller zu Alt-Mölln ihn zu dieser Zeit abdämmt, um das Wasser zu seiner Mühle zu leiten, von wo es durch eine Nebenleitung unterhalb des Möllnschen Sees in die Stecknitz fließt.“³⁹

Neben geometrischen Angaben zur Scheitelhaltung liefert dieses Zitat eine äußerst detaillierte Beschreibung der wasserwirtschaftlichen Situation eines Schleusungsvorganges an der Scheitelhaltung, welche für eine spätere

³⁵ Rehder 1892, 1, 10 f., 67 – Zwar wird hier ausdrücklich behauptet, dass die Scheitelhaltung ausschließlich durch Quellen gespeist wird, aber die topografische Situation und ein Vergleich der heutigen Einzugsgebietsgröße mit den hist. Angaben lassen den Schluss zu, dass der Priesterbach auch zu Zeiten Rehders in die Scheitelhaltung mündete (vgl. hierzu Abs. 4 und Tab. 2).

³⁶ Ergänzungen, Erläuterungen oder Auslassungen von Zitaten, die vom Verfasser vorgenommen wurden, sind im Folgenden stets durch [...] gekennzeichnet.

³⁷ Hogrewe 1780, 39.

³⁸ Die Zuordnung des Hornbeker Baches zu einem heutigen Gewässer konnte nicht erfolgen.

³⁹ Behrens 1818, 7 f.

Kalibrierung des Simulationsmodells wertvolle Informationen liefert. Inwieweit allerdings ein „Rücken“ im Verlauf der Scheitelhaltung realistisch ist, bleibt fraglich. Schließlich mussten die Schiffe bei nahezu horizontaler Wasserspiegellage über diese Erhebung fahren – aufgrund der geringen Wassertiefe sicherlich ein erhebliches Risiko.

Der von Behrens erwähnte Wasserverlust beim Schleusen von etwa 54.000 m³, der in einem Zeitraum von 72 bis 80 Stunden durch natürliche Zuflüsse ausgeglichen worden sei, entspricht einem natürlichen Zufluss von rund 30 l/s. Bezogen auf die von Rehder genannte Einzugsgebietsgröße von 31,4 km² ergibt sich eine Abflussspende von lediglich rund 0,9 l/(s*km²).⁴⁰ Es ist in Frage zu stellen, inwieweit die Schätzung von Behrens hinsichtlich des Schleusungsverlustes zutreffend ist.

2.2.1 Die Hahnenburger Schleusentreppe

Auf einer Strecke von rund 450 m musste die Höhendifferenz von etwa 5,10 m⁴¹ – bezogen auf die maximale Wasserspiegellage – zwischen dem Möllner See und der Scheitelhaltung überwunden werden. Hierzu wurden möglicherweise bereits zur Eröffnung der Stecknitzfahrt 1398 zwei hölzerne Kammer-schleusen angelegt. Die tatsächliche Art der Schleuse(n) zu diesen Zeitpunkt ist unbekannt (vgl. hierzu Abs. 9). Es ist nachzuweisen, ob ein Betrieb mit zwei Stauschleusen unter hydrologischen und hydraulischen Gesichtspunkten überhaupt möglich gewesen wäre.

Durch den zusätzlichen Bau der sog. Stauschleuse „An der Kehle“⁴² konnte an diesem Standort ab 1601 die Schifffahrt erleichtert werden. Diese zunächst hölzerne Schleusen-anlage wurde im Jahr 1711 durch eine massive ersetzt.⁴³ Mit einer Differenz von lediglich 17 cm zwischen maximalen Stauwasserspiegel und abgelaufener Stauwelle war sie die kleinste im gesamten Verlauf der Stecknitzfahrt.

Die Untere Hahnenburger Schleuse wurde 1712 und die Obere um 1716 in massiver Bauweise am gleichen Standort neu errichtet. Nach der Sprengung durch die Franzosen musste die gesamte Schleusentreppe 1814 umfassend repariert werden.⁴⁴ Da es keine Ausweichmöglichkeiten gab, ruhte der Schiffsverkehr stets während der Bauarbeiten. Die Waren wurden auf dem Landweg transportiert.

2.2.2 Die Hornbeker oder Grambeker Schleuse

Zur Verbesserung der Schifffahrtsbedingungen wurde die Scheitelstrecke durch den Bau der Hornbeker Stauschleuse (ab 1830 Grambeker Schleuse genannt)⁴⁵ um etwa 3,2 km verkürzt (vgl. Abs. 2.2).

Allerdings sind die Angaben über den Zeitpunkt der Errichtung widersprüchlich. Während Rehder ein Baujahr von 1692 angibt⁴⁶, nennt Woltmann ein Baujahr von etwa 1738⁴⁷ und Behrens datiert die Errichtung der Stauan-

⁴² Aufgrund der Lage des Wehres im Anschnitt zwischen dem Scheitelkanal und dem Möllner See wurde sie *Stauschleuse An der Kehle* genannt.

⁴³ Rehder 1890, 575.

⁴⁴ Müller 2002, 29.

⁴⁵ In der historischen Literatur wird das Hornbeker Wehr häufig nur als „Stauschleuse“ bezeichnet.

⁴⁶ Rehder 1890, 575.

⁴⁷ Zwar ist die Abhandlung von Woltmann im Jahr 1826 erschienen, wie er allerdings im nachträglich eingefügten Vorwort erläutert, wurde sie bereits 1808 verfasst. In Bezug auf die Hornbeker Schleuse wird erwähnt, dass diese „vor etwa 70 Jahren“ errichtet wurde (Woltmann, 1826, 171), was demzufolge einem Baujahr von etwa 1738 entspräche.

⁴⁰ Zum Vergleich gibt Bähr 2001, 42 eine mittlere Abflussspende (Mq) von rund 5,26 l/(s*km²) an. Das Merkblatt M2 des Landesamtes für Natur- und Umweltschutz des Landes Schleswig Holstein (LANU) nennt eine Größenordnung von Mq = 9 bis 11 l/(s*km²) für Geest- und Marschbereiche in Schleswig-Holstein. Ein Vergleich mit modernen Pegeldaten zeigt, dass diese Abflussspende im Bereich einer Niedrigwasserführung liegt (vgl. hierzu Abs. 4 und Abb. 8).

⁴¹ vgl. Behrens 1818, 9 „fällt der Kanal 17 Fuss und 6 Zoll“ in den Möllner See.

lage etwa in das Jahr 1768.⁴⁸ Interessanterweise vermerkt Rehder im Weiteren, dass erst für das Jahr 1750 die Anstellung eines Schleusenmeisters vereinbart wurde, was in etwa zu den Angaben Woltmanns und Behrens passt. Ohne Urkunden über den Bau der Hornbeker Stauschleuse wird sich deren Baudatum allerdings nicht eindeutig bestimmen lassen.

Die hölzerne Stauschleuse wurde in den Jahren 1829/30 durch eine neu errichtete massive Kammerschleuse ersetzt.⁴⁹ Hierdurch dürfte sich die wasserwirtschaftliche Situation im Scheitelkanal wesentlich verbessert haben, da nunmehr bei den Schleusungen deutlich weniger Wasser an die Delvenau abgegeben wurde (vgl. Abs. 3.1).

2.2.3 Die Zienburger Stauschleuse

Den südlichen Abschluss des Scheitelkanals bildete bis zum Bau der Hornbeker Stauschleuse die Zienburger Stauschleuse. Für das Jahr 1749 ist ein massiver Neubau und für 1849 eine umfassende Reparatur bezeugt.⁵⁰

Zwar behaupteten die Lauenburger Schiffer, dass „diese Schleuse den Wasserstand auf dem Kanal bestimme“.⁵¹ Wie Müller ausführt, dürfte diese Beschwerde von lauenburgischen Holzfrachtern stammen, welche den Lübecker Stecknitzfahrern Vorrang zu gewähren hatten. Die Beschwerde ist verständlich, weil nach abgelassener Schwallwelle der Wasserstand in der oberwasserseitigen Kanalhaltung durch den Sunk bis zur Hornbeker Schleuse so niedrig gewesen sein dürfte, dass zunächst keine Schifffahrt mehr möglich war. Der Wasserstand glich sich vermutlich erst im Verlauf mehrerer Tage wieder an. Die Aussage der Lauenburger Schiffer wird sich daher in erster Linie auf eben diese Haltung bezogen haben.⁵²

⁴⁸ Behrens 1818, 8 – Behrens berichtet, dass die Stauschleuse „vor etwa 50 Jahren“ gebaut worden sei. Ausgehend vom Erscheinungsjahr des Berichtes ergibt sich hieraus ein Baujahr von etwa 1768.

⁴⁹ Rehder 1890, 577.

⁵⁰ ebd.

⁵¹ AHL Wasserbau IV c 10 Packen 53 d (zitiert nach: Müller 2002, 33).

⁵² Müller 2002, 33.

Die Wirkung des beim Öffnen der Stauschleusen abfließenden Wassers auf die unterwasserseitigen Ufer und Sohle lässt sich anhand folgender Bemerkung von Behrens ermessen: „Vor der Schleuse liegt ein nicht unbeträchtlicher Teich, welcher sich von Jahr zu Jahr durch Wellenschlag vergrößert.“⁵³

Gemeint ist hiermit unzweifelhaft der Kolk, der beim Öffnen der Schleusentore am unterwasserseitigen Gewässerbett durch das schießend abfließende Wasser hervorgerufen wurde. Deutlich erkennbar ist heute beispielsweise noch der Kolk unterwasserseitig der Dückerschleuse. Das Problem der Kolkbildung dürfte im Übrigen für alle Stauschleusen an der Stecknitzfahrt bestanden haben.

2.3 Die Delvenau

Bis zum Beginn der Stecknitzfahrt Ende des 14. Jahrhunderts war die Delvenau nicht schiffbar, da ihr Wasser durch zwei Mühlen-dämme bei Büchen und Buchhorst gestaut worden war.⁵⁴ In den Verträgen zum Ausbau der Stecknitzfahrt von 1390 wurde vereinbart, „die Delvenau vom Möllner See bis zur Elbe [...] so weit auszuräumen, zu begradigen und zu vertiefen, dass auf ihr sowohl auf- wie abwärts überall zwei Schiffe neben einander fahren könnten.“⁵⁵ Der Anschluss des Scheitelkanals an den Oberlauf der Delvenau erfolgte an der Zienburger Stauschleuse (vgl. Abs. 2.2.3). Insgesamt waren von Beginn an auf der Delvenau sieben Schleusenanlagen eingerichtet, welche einen Höhenunterschied zwischen dem Scheitelkanal und der Delvenau bei Lauenburg von über 11 m ermöglichten. Mit Ausnahme der Palmschleuse handelte es sich ausschließlich um hölzerne Stauschleusen. Diese war möglicherweise bereits 1393 als Kammerschleuse angelegt (vgl. Abs. 2.3.6).

⁵³ Behrens 1818, 12.

⁵⁴ Rehder 1890, 572.

⁵⁵ Rehder 1890, 572.

2.3.1 Die Seeburger Schleuse

Etwa 2,5 km unterhalb der Zienburger befand sich mit der Seeburger Stauschleuse die erste Stauanlage im Verlauf der Delvenau, die im Jahr 1834 in hölzerner Bauweise neu aufgebaut wurde. In den Jahren 1863, 1878 und 1883 erfolgte jeweils eine Reparatur.⁵⁶ Unterhalb des Wehres befand sich eine Furt.

2.3.2 Die Siebeneichener Schleuse

Wie das Seeburger Wehr wurde auch die Siebeneichener Schleuse (auch Todenschleuse genannt) bereits Ende des 14. Jahrhunderts mit der Einrichtung der Stecknitzfahrt in Betrieb genommen. Im Jahr 1792 wurde sie in hölzerner Bauweise neu angelegt.⁵⁷ Ab 1850 wurde die Stauschleuse durch eine hölzerne Kammerschleuse ersetzt. Wie Müller ausführt, muss es in diesem Zusammenhang zu erheblichen Baggerarbeiten im Unterlauf gekommen sein.⁵⁸ Schließlich werden für die Jahre 1872 und 1879 Reparaturen größeren Umfangs angegeben.⁵⁹

2.3.3 Die Büchener Schleuse

Auch die Büchener Stauschleuse existierte von Beginn der Stecknitzfahrt an. Rehder erwähnt einen Neubau für das Jahr 1807, während Woltmann einen Neubau auf 1789 datiert.⁶⁰ Übereinstimmend sei die Schleuse allerdings als hölzerne Stauschleuse wieder aufgebaut worden. Eine Reparatur der Stauanlage hat nach Rehder 1838/39 stattgefunden.

2.3.4 Die Niebuhrschleuse

Eine weitere Stauschleuse im Verlauf der Delvenau war die Niebuhrschleuse (oder Behnenschleuse). Für diese liegen sehr wenige Informationen vor. Lediglich für die Jahre

1827 und 1845 sind größere Reparaturen belegt.⁶¹

2.3.5 Die Dückerschleuse oder Kronenschleuse

Die Dückerschleuse ist die einzige erhaltene Stauschleuse der Stecknitzfahrt. Ebenso wie die anderen entsprechenden Bauwerke wurde sie zunächst aus Holz errichtet, 1789 allerdings durch einen massiven Neubau ersetzt, bei dem Stemmtore nach neuen Plänen Hogreves installiert waren.⁶² Nachdem die Schleuse von den Franzosen gesprengt worden war, wurde sie im Jahr 1815 neu aufgebaut und mit einem Schleusenbaum versehen.⁶³ Eine Reparatur wird für das Jahr 1834 angegeben.⁶⁴ Eine umfassende Untersuchung der Dückerschleuse unter wasserwirtschaftlichen und konstruktiven Aspekten erfolgte durch Abert/Hidalgo/ Keilholz.

2.3.6 Die Palmschleuse

Die Palmschleuse (oder: Bockhorster bzw. Buchhorster Schleuse) ist die einzig erhaltene Kammerschleuse der historischen Stecknitzfahrt. Im engeren Sinne ist sie eine Kesselschleuse, da die Schleusenkammer deutlich breiter ausgeführt ist als die Tore an Unter- und Oberhaupt und somit mehreren Schiffen nebeneinander Platz bot.

Müller führt aus, dass bereits vor 1393 eine Kammerschleuse existiert haben muss, da am dortigen Standort eine Mühle betrieben worden sei.⁶⁵ Allerdings sei diese Anlage noch in hölzerner Bauweise ausgeführt gewesen. Rehder gibt an, dass die Palmschleuse mit großer Sicherheit bereits vor 1480 als Kammerschleuse eingerichtet war. Hierbei bezieht

⁵⁶ Rehder 1890, 577.

⁵⁷ Rehder 1890, 576.

⁵⁸ Müller 2002, 35; vgl. hierzu auch Abs. 3.1.3.

⁵⁹ Rehder 1890, 575.

⁶⁰ Rehder 1890, 576 f. und Woltmann 1826, 172 f.

⁶¹ Rehder 1890, 577.

⁶² Zur Funktionsweise der unterschiedlichen Tortypen s. Abs. 3.2.

⁶³ Müller 2002, 38 f.

⁶⁴ Rehder 1890, 577.

⁶⁵ Müller 2002, 39 f. – Müller argumentierte mit dem Recht der in unmittelbarer Nachbarschaft gelegenen Mühle, welche für den kontinuierlichen Betrieb eines möglichst konstanten Wasserstandes bedurft hätte.

es sich auf eine nicht weiter erläuterte Nachricht aus dem Jahre 1480, in der die Palm-schleuse als „Kiste“ bezeichnet worden sei. Dieses deute – auch mit Blick auf die örtlichen Begebenheiten – auf die Existenz einer Kammerschleuse hin.⁶⁶

Im Jahr 1724 wurde dann die heute noch existierende Kesselschleuse in massiver Bauweise errichtet, die bis zu zwölf Schiffen Platz bot.⁶⁷

2.3.7 Die Frauweider- oder Hafenschleuse

Um die Delvenaumündung bei Niedrigwasser der Elbe noch schiffbar zu halten, wurde die sog. Frauweider- oder Hafenschleuse eingerichtet. Sie hatte einen Abstand zur Palm-schleuse von lediglich 1,5 km und wurde nur gebraucht, wenn die „*Elbe sehr niedrig*“ war.⁶⁸ Bestand zunächst nur eine hölzerne Stauschleuse, so wurde sie im Jahr 1747 in massiver Bauweise erneuert. Nach der Sprengung durch französische Truppen musste 1816 eine umfassende Reparatur erfolgen. Schließlich erfolgte 1852 der Umbau zu einer massiven Kammerschleuse.⁶⁹

3. Technische Randbedingungen

3.1 Die Schleusanlagen

Aufgrund geringer Zuflüsse in die jeweils oberen Stauhaltungen war es unter ökonomischen und wasserwirtschaftlichen Gesichtspunkten erforderlich, die Tore der Stauschleusen erst dann zu öffnen, wenn genügend Schiffe für eine Passage vor einer Schleuse versammelt waren (Gruppenschiffahrt) oder ein bestimmter „Zapfeltag“ erreicht war (vgl. Abs. 5.2). Die Schiffe konnten auf der Welle bis zur nächsten Schleuse „reiten“ (Fahrt auf Schwellung). Eine kontinuierliche Schifffahrt ohne diese Schleusen wäre auf der historischen Stecknitzfahrt aufgrund eines zu gerin-

gen Wasserstandes nicht möglich gewesen. So hätte die Wassertiefe bei Normalabfluss am Ende der Scheitelhaltung im Bereich der Hahnenburger Schleusentreppe (Einzugsgebietsgröße etwa 15,7 km²) bei einem angenommenen Trapezprofil mit einer Sohlbreite von 12 m (Böschungsneigung 1 : 2) lediglich etwa 7 cm betragen.⁷⁰ In diesem Zusammenhang wären die Delvenau und die Stecknitz im Sinne heutiger Terminologie als staugeregelte Fließgewässer zu bezeichnen. Auf der historischen Stecknitzfahrt kam neben der zweitorigen Kammerschleuse die eintorige Stauschleuse zur Anwendung. Beide Einrichtungen sind Wehre mit beweglichen Verschlüssen.

Insbesondere bei den Stauschleusen ist (unabhängig von der Torart; vgl. Abs. 3.2) davon auszugehen, dass im Unterwasser eine Befestigung der Sohle auf einer Länge von bis zu 20 m erforderlich gewesen ist, um eine Auskolkung direkt am Bauwerk zu verhindern. Dieses hätte die Standsicherheit der gesamten Stauanlage gefährden können. Da aber die Fahrt auf Schwellung auf das schnelle Ablassen des Wasser angewiesen ist, standen der bestmöglichen Nutzung der Schwallwelle konstruktive Belange entgegen.

3.1.1 Stauschleusen

Sie zeichneten sich dadurch aus, dass sie – anders als die Kammerschleusen – nur ein Tor hatten (vgl. Abb. 3). Sie mussten für die Schiffspassage so lange geöffnet bleiben, bis sich der Wasserstand von Ober- und Unterwasser weitgehend ausgeglichen hatte, da ein Schließen der Tore gegen den Wasserdruck nur bedingt möglich gewesen sein dürfte. Nach einer langen Öffnungszeit der Schleusentore stellte sich im betroffenen Kanalabschnitt eine konstante Wassertiefe ein (Normalabfluss).

⁶⁶ Rehder 1890, 575.

⁶⁷ Rehder 1890, 577.

⁶⁸ Behrens 1818, 14.

⁶⁹ Rehder 1890, 575 ff.

⁷⁰ Abschätzung der Abflusstiefe anhand der allgemeinen Fließformel von Manning/Strickler nach den geometrischen Angaben Rehders (Längsgefälle etwa $I = 0,3 ‰$, $k_{St} = 35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$) bei einer Abflussspende von $q = 5,3 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$.

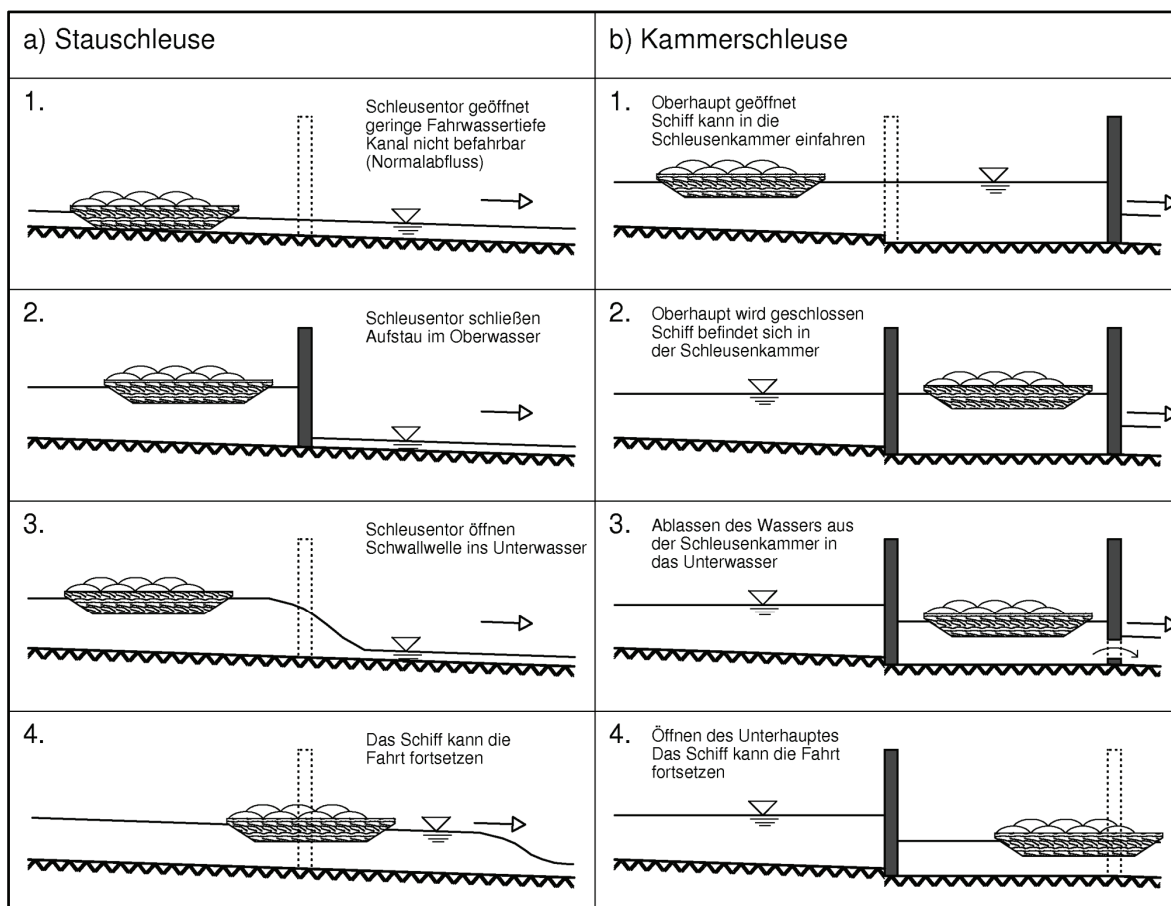


Abb. 3: Schematische Darstellung der Schleusungsvorgänge an Stau- und Kammerschleusen (Darstellung für die Kammerschleuse am Beispiel einer Talschleusung; Bergschleusungen erfolgen sinngemäß).

Diese dürfte bei einem geringen Wasserangebot und einem großen Sohlgefälle nicht ausreichend für die Schifffahrt gewesen sein (Nr. 1 in Abb. 3a; vgl. auch Abs. 3.1 und Fußnote 70).

Zunächst mussten also die Tore der Stauschleuse solange geschlossen werden, bis sich eine genügend hohe Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser eingestellt hatte (Nr. 2 in Abb. 3a). Die Dauer, bis sich genügend Wasser vor der Stauschleuse angesammelt hatte, hing von der Größe der Zuflüsse (Größe des Einzugsgebietes, Abflusspende, Wasserabgabe der oberen Stauanlagen etc.), der Kanalgeometrie (Länge der oberwasserseitigen Haltung, Sohlgefälle, Querschnitt) und möglichen Spaltwasserverlusten ab.

Mit dem Öffnen der Schleusentore ergoss sich eine Schwallwelle in das Unterwasser (Nr. 3 in Abb. 3a). Die Schiffe im Oberwasser mussten allerdings solange warten, bis der Schleusenbaum (vgl. Abs. 3.2) entfernt und somit der Schleusenquerschnitt für die Passage freigegeben war. Erst dann konnten sie das Schleusentor passieren und „auf der Welle“ talwärts die Fahrt fortsetzen (Nr. 4 in Abb. 3a). Allein durch die künstliche, temporäre Abflusserhöhung war eine ausreichende Wassertiefe vorhanden. Möglicherweise war bis zur Freigabe des Schleusenquerschnittes durch Umlegen des Schleusenbaumes aber schon ein Großteil der für die Schifffahrt erforderlichen Schwallwelle abgelaufen.

Erst nachdem die talwärts fahrenden Schiffe die Schleuse passiert hatten, wurden die berg-

gehenden Schiffe hinauf gezogen bzw. getreidelt. Anschließend konnten die Schleusentore, nachdem sich der Wasserstand in Ober- und Unterwasser weitgehend ausgeglichen hatte, wieder geschlossen werden, und es erfolgte ein erneuter Aufstau des Oberwassers.

Von Uhlemann wird mit Verweis auf Wreden zum Betrieb dieses Schleusentypes ausgeführt:

„Die Stauschleusenschiffahrt war eine Fahrt auf Schwellungen. Nachdem sich etwa acht bis zwölf Schiffe vor der Schleuse angesammelt hatten, wurden die Schützen gezogen und dann so lange gewartet, bis sich das Stauefälle [...], das meist etwa 4 Fuß [etwa 1,20 m] betrug, auf etwa die Hälfte verringert hatte [...]. Nach Erfahrungswerten stellte sich dabei ein Wasserspiegelgefälle von etwa 0,30 % ein, und die Strömungsgeschwindigkeit muss in diesem Fall noch etwa 1,5 m/s, maximal 2 m/s, betragen haben. Nun wurden die Tore geöffnet, und die talwärts fahrenden Schiffe fuhren mit der Welle flussab. Die Bergfahrer dagegen mussten mühsam gegen die Strömung gezogen werden.“⁷¹

Für die Schleusung wurden demnach nacheinander die Schüttbretter vertikal herausgezogen⁷² und solange gewartet, bis sich der Wasserstand zwischen Ober- und Unterwasser etwa bis zur Hälfte (nach Wreden ca. 60 cm) ausgeglichen hatte. Erst dann konnten, aufgrund der reduzierten Strömungskraft des Wassers, die beiden Rahmenflügel und der Schleusenbaum aus dem Schleusenquerschnitt gedreht werden und die Schiffe konnten passieren.

3.1.2 Kammerschleusen

Sie sind dadurch gekennzeichnet, dass sie zwei Gewässer unterschiedlicher Höhenlage durch zwei Verschlüsse gegeneinander abgrenzen. Für den Betrieb zwingend erforder-

lich ist hierbei, dass stets nur einer der beiden Verschlüsse geöffnet sein darf (vgl. Abb. 3b). Für talfahrende Schiffe wurde zunächst das obere Tor (Oberhaupt) geöffnet, und der Wasserstand in der Schleusenkammer glich sich dem Oberwasser an. Das Schiff konnte in die Schleusenkammer einfahren (Nr. 1 in Abb. 3b). Danach wurde das Oberhaupttor geschlossen. Das Schiff befand sich nunmehr in einem abgeschlossenen Becken mit ruhendem Wasserspiegel (Nr. 2 in Abb. 3b).

Danach wurde kontrolliert Wasser aus der Schleusenkammer an das Unterwasser abgegeben, bis sich der Wasserstand in der Schleusenkammer dem Unterwasser angeglichen hatte (Nr. 3 in Abb. 3b). Nun konnten die Tore des Unterhauptes geöffnet werden, und das Schiff konnte seine Fahrt im Unterwasser fortsetzen (Nr. 4 in Abb. 3b). Für bergfahrende Schiffe erfolgte das Vorgehen entsprechend entgegengesetzt.

Die wasserwirtschaftlichen Vorteile einer Kammerschleuse gegenüber der Stauschleuse ergaben sich aus der deutlich geringeren Wasserabgabe an das Unterwasser und dem entfallenden notwendigen Wiederaufstau im Oberwasser. Aus demselben Grund sind häufigere Schleusungen möglich, so dass bei der Kammerschleuse davon ausgegangen werden darf, dass eine Schleusung dann erfolgt, wenn ein Schiff die Schleuse erreicht. Dieses dürfte an der Stecknitzfahrt aufgrund der Zeitersparnis ein beachtlicher ökonomischer Vorteil gegenüber der Stauschleuse gewesen sein.

3.1.3 Wasserwirtschaftliche Betrachtungen der unterschiedlichen Schleusentypen

Bereits während des Betriebes der Stecknitzfahrt dürfte man sich des wasserwirtschaftlichen und ökonomischen Vorteils der heute weit verbreiteten Kammerschleuse gegenüber der Stauschleuse bewusst gewesen sein. Mittels der zweitorigen Kammerschleusen erfolgte die Abgabe einer nur relativ kleinen Wassermenge aus der Schleusenkammer an das Unterwasser. Hierdurch konnte im Oberwasser ein beachtliches Wasservolumen „gespart“ werden, was einen höheren Wasserstand im

⁷¹ Uhlemann 2000, 16; dort mit Verweis auf Wreden 1919, 19 f.

⁷² Es ist davon auszugehen, dass sich pro Wehrfeld mehrere einzelne Schüttbretter übereinander befanden, die nacheinander gezogen werden konnten.

Aus der Wahl der Schleusenart ergaben sich somit unterschiedliche Auswirkungen auf die wasserwirtschaftliche Situation. Eine Stauschleuse beförderte die Schifffahrt vornehmlich im Unterwasser, da durch den deutlich vergrößerten Abfluss nach dem Öffnen der Tore unterwasserseitig ein höherer, schiffbarer Wasserstand vorhanden war. Die Kammerschleuse war aufgrund wenigstens eines ständig geschlossenen Tores vor Allem für einen höheren Wasserstand im Oberwasser vorteilhaft.

Die Funktion einer Kammerschleuse wurde auf der historischen Stecknitzfahrt teilweise über eine nahe beieinander liegende Anordnung zweier Stauschleusen angenähert.⁷⁴ Das untere Wehr übernimmt in diesem Fall quasi die Funktion des Unterhauptes einer Kammerschleuse. Für den Betrieb resultiert hieraus, dass stets nur eine Stauschleuse geöffnet sein durfte, um den freien Ablauf des Wassers zu verhindern – der Wasserverlust wurde verringert. Voraussetzung hierfür war allerdings, dass das Tor des unteren Wehres die gleiche Höhe hatte wie das obere. Inwieweit diese Vermutung den historischen Tatsachen entspricht, lässt sich nicht belegen.

Zum Betrieb der Kleinen Donnerschleuse wird von Behrens vermerkt:

„In der Regel wird sie nur gebraucht, wenn der Kanal unterhalb nicht mit Kraut bewachsen ist, weil alsdann das Unterwasser bei dem vorhandenen Zwischengefälle nach der Berkenthiner Schleuse zu schnell abläuft, welches der vielen seichten Stellen wegen die Fahrt hemmen würde.“⁷⁵

Wreden ergänzt hierzu:

„Auf der Stecknitz war die Durchfahrt durch die erste (stromaufwärts liegende) Donnerschleuse die gefahrvollste. Um den hohen Wasserfall und damit die Gefahren der

Durchfahrt zu mindern, wurde die zweite (kleine) Donnerschleuse nur 192 m unterhalb der ersten angelegt.“⁷⁶

Bezogen auf das obere Wehr ergibt sich bei geschlossenem unterem Wehr eine kleinere Wasserspiegeldifferenz, was sowohl Vorteile bei der Bedienung bzw. der Öffnung der Schleusentore (vgl. Abs. 3.2) als auch eine Minderung der Kolkbildung mit sich brachte. Dieses dürfte vor Allem bei geringen Unterwasserständen (etwa *„wenn der Kanal unterhalb nicht mit Kraut bewachsen ist“⁷⁷* [s.o.] oder nach Trockenwetterperioden) vorteilhaft gewesen sein. Geht man davon aus, dass unterhalb der Wehre meist ein Kolk vorhanden war, so kann ein durch ein zweites Tor bedingter höherer Unterwasserstand die Schiffbarkeit am Übergang zwischen Kolk und anschließendem Kanalbett verbessern (Überwindung der *„seichten Stellen“* [s.o.]). Die Anlage benachbarter Stauschleusen kann vor diesem Hintergrund zur (empirischen) Entwicklung der Kammerschleuse beigetragen haben (vgl. hierzu Abs. 9).

3.2 Die Schleusentore

Neben der Art der Schleuse hatte auch die Konstruktion der Schleusentore nicht unerheblichen Einfluss auf die Wasserwirtschaft an der Stecknitzfahrt. Im Wesentlichen kamen zwei unterschiedliche Torarten zur Anwendung: Das heute gebräuchliche Stemmtorpaar und ein einfacheres Tor mit einem sog. Schleusenbaum als Widerlager.

⁷⁴ Die beiden Donnerschleusen, Abstand etwa 190 m, Abs. 2.1.2; die beiden Oberschleusen, Abstand etwa 420 m, Abs. 2.1.3; die Stauschleuse „An der Kehle“, Abstand zur unteren Hahnenburger Kammerschleuse etwa 150 m, Abs. 2.2.1.

⁷⁵ Behrens 1818, 10.

⁷⁶ Wreden 1919, 20 – Im Weiteren bezieht sich Wreden offenbar auf Behrens, wenn er schreibt, dass die kleine Donnerschleuse nur bei nicht verkrauteten Ufern zur Überwindung von Untiefen benötigt wurde.

⁷⁷ Die Abflusstiefe bei nicht verkrauteten Gewässern ist aufgrund einer geringeren Rauheit vergleichsweise klein.

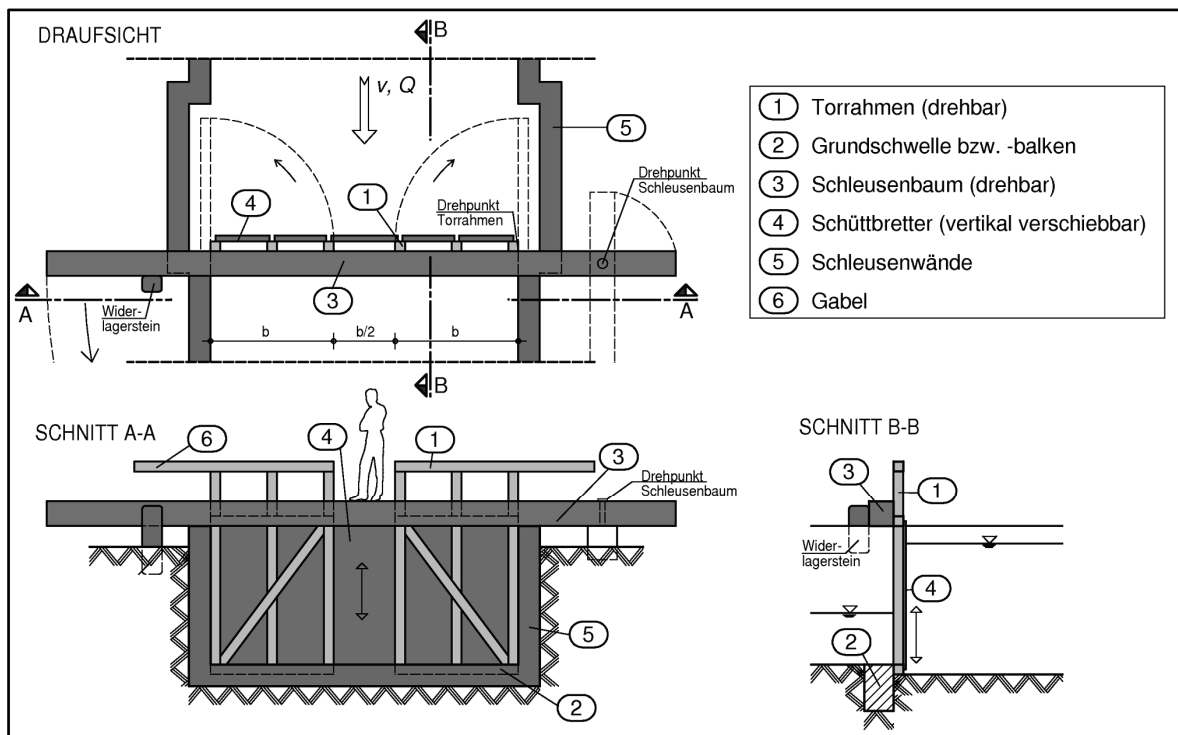


Abb. 5: Darstellung der Tore mit Schleusenbaum.

3.2.1 Das Tor mit Schleusenbaum

Diese Tore weisen einen Schleusenbaum auf, der als oberes Widerlager für die Torrahmen diene. Die in einer Ebene liegenden Tore selbst bestanden aus einem Rahmenwerk (Nr. 1 in Abb. 5), einem hölzernen Grundbalken oder gemauerten Drempel als unteres Widerlager (Nr. 2 in Abb. 5) und dem Schleusenbaum als oberes Widerlager (Nr. 3 in Abb. 5), der zudem als Fußgängerbrücke und als Bedienstetsteg für den Schleusenmeister diene. Zwischen den Rahmenhölzern waren plattenförmige Schützbrettern (Nr. 4 in Abb. 5) gesetzt, die den Fließquerschnitt versperrten. Die beiden Torrahmen waren drehbar in den (in späterer Zeit meist) gemauerten Schleusenwänden (Nr. 5 in Abb. 5) gelagert, so dass sie aus dem Fließquerschnitt gedreht werden konnten. Dieses konnte über auf den Ufern angebrachte Seilwinden oder mittels verlängerter oberer Rahmenbalken (einer sog. Gabel, Nr. 6 in Abb. 5) erfolgen, die nach

dem Hebelprinzip die Drehbewegung ermöglichen. Ebenso war es möglich, den Schleusenbaum (Nr. 3 in Abb. 5), aus dem Schleusenquerschnitt zu drehen. Dieser war auf einer Seite drehbar gelagert; auf der entgegengesetzten Seite musste sich ein Widerlager (-stein) zur Aufnahme der Druckkraft aus dem aufgestauten Wasser befinden haben.

Wie Müller ausführt, waren die Schleusentore mit Schleusenbaum so ausgeführt, dass in jedem Torflügel der Breite b zwei Schützbretter untergebracht wurden. In die Mitte zwischen den beiden Flügeln habe man ein fünftes Schützbrett mit der Breite $b/2$ einfügen können. Hierdurch sei die Länge der Flügel verkürzt worden, wodurch sie einen geringeren Widerstand beim Aufdrehen gehabt hätten.⁷⁸ Ein früheres Öffnen der Tore und somit eine Verkürzung der Schleusungszeit sei mög-

⁷⁸ Die beim Öffnen der Torflügel zu überwindende Strömungskraft hängt linear von der angeströmten (bzw. „eingetauchten“) Fläche der Rahmenhölzer ab. Kürzere Rahmenflügel benötigen zudem ein kleineres erforderliches Drehmoment.

lich gewesen,⁷⁹ so dass die Schwallwelle besser durch die talfahrenden Schiffe genutzt werden konnte. Zur Konstruktion der Schleusentore mit Schleusenbaum vermerkt Hogrewe:

„Die Schleusen auf der vorerwehnten Stecknitzfahrt sind von den vorbeschriebenen [Stemmtoren, vgl. Abs. 3.2.2] nur darin zu unterscheiden, daß sich auf jeder Seite, ein aus drey Ständern, zwey Querriegeln und einem Querbande zusammen gesetzter Thürrahmen befindet, die sich in Angeln bewegen, und sich unten gegen die Schwelle, oben aber gegen einen Drehbalken [dem Schleusenbaum], der zugleich zum Stege dienet, stützen. Sie sind nur so breit, dass, wenn sie geschlossen, ein Raum zwischen ihnen bleibet, der ihrer halben Breite gleich ist, so dass Oefnungen entstehen. Diese werden durch Schüttbretter zugesetzt, [...]“⁸⁰

In Abb. 5 ist ein Schleusentor mit Schleusenbaum, wie es von Hogrewe 1780 (vor dem Bau der Dückerschleuse mit Stemmtoren) beschrieben wird, dargestellt.

Aufgrund der einseitig größeren hydrostatischen Druckhöhe bei vollem Wasserstau (bis max. ca. 180 cm) und der daraus resultierenden Strömungskraft des Wassers dürfte es kaum möglich gewesen sein, die Schleusentore mit geschlossenen Schüttbrettern zu öffnen. Zum Öffnen der Tore war ein (partieller) Ausgleich der Wasserspiegeldifferenz notwendig, welcher durch das Ziehen einzelner Schüttbretter erreicht wurde (auch wurde hierdurch die angeströmte Torfläche und somit der Strömungswiderstand reduziert). Aus der sukzessiven Querschnittserweiterung resultierte eine allmähliche Abflussteigerung, welche eine relativ flache, langgezogene Schwallwelle zur Folge hatte. Es muss also das Bestreben der Stecknitzfahrer gewesen sein, möglichst bald nach dem Ziehen des ersten Schüttbrettes die Schleuse zu passieren, um die Schwallwelle optimal für die Talfahrt nutzen zu können. Ein Großteil des für die

Schiffahrt erforderlichen Wassers wäre ansonsten möglicherweise bereits ungenutzt abgelaufen.

3.2.2 Das Stemmtor

Das Stemmtor war bis in heutige Zeit (mit) die gebräuchlichste Torart bei Binnen- und Seeschleusen. Die geschlossenen Tore waren um etwa 10° gegen die Strömungsrichtung verdreht, stützten sich gegeneinander und leiteten die Horizontalkräfte aus dem Wasserdruck in die seitlichen Widerlager (Nr. 2 in Abb. 6) ab. Ansonsten war die Funktionsweise der Schleusenanlagen mit Stemmtoren ähnlich denen mit Schleusenbaum. Der Fließquerschnitt wurde durch einzelne Schüttbretter (Nr. 3 in Abb. 6) zugesetzt, welche vor die eigentlichen Torrahmen (Nr. 1 in Abb. 6) gesetzt wurde. Die Schüttbretter konnten vor dem Öffnen der Tore einzeln gezogen werden, wodurch sich der Wasserspiegel im Ober- und Unterwasser langsam angleichen konnte. Erst dann konnten die Torflügel entgegen der Strömungskraft geöffnet werden, und die Schiffe konnten passieren. Als unteres Widerlager und zur Überwindung der Hubhöhe bei Kammerschleusen wurde am Fußpunkt vor den Torrahmen ein i. d. R. gemauerter (im Grundriss) v-förmiger Drempe bzw. eine Grundschwelle (Nr. 5 in Abb. 6) angeordnet.

⁷⁹ Müller 2002, 21.

⁸⁰ Hogrewe 1780, 10.

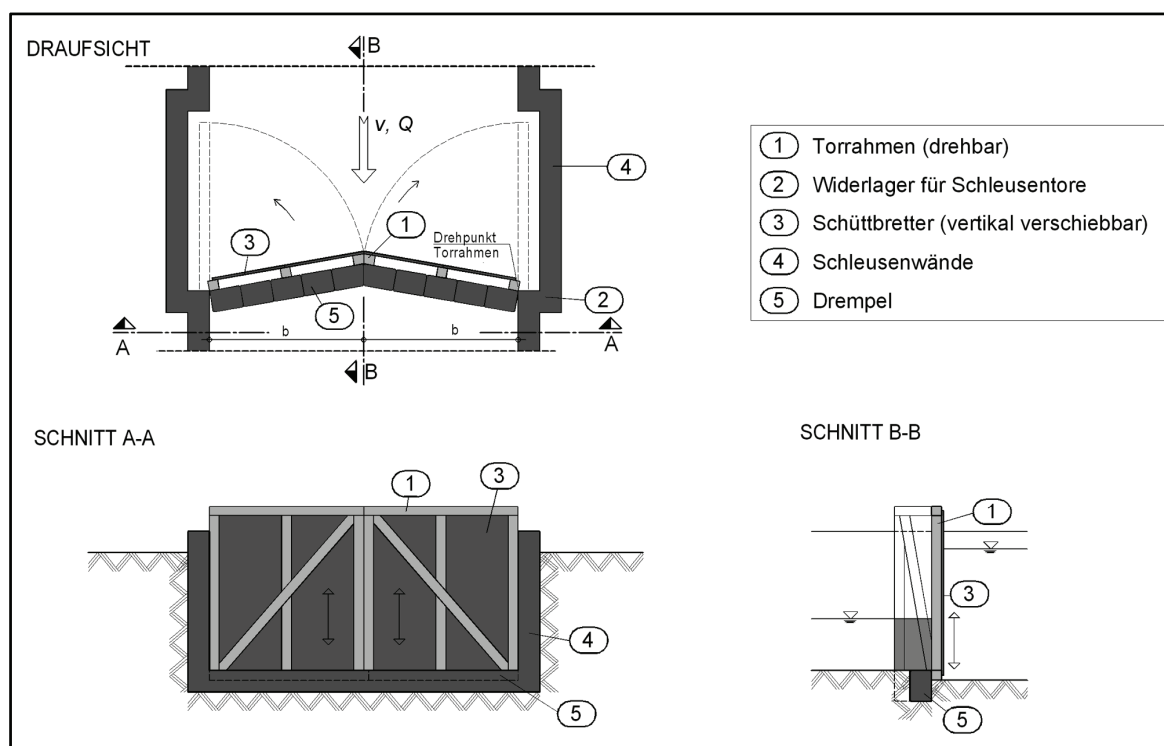


Abb. 6: Darstellung der Tore mit Stemmtoren.

3.2.3 Wasserwirtschaftliche Betrachtungen der unterschiedlichen Schleusentore

Bei der Fahrt auf Schwelung war eine möglichst kurze Zeitspanne zwischen dem Ziehen des ersten Schüttbrettes und der Freigabe des Schleusenquerschnittes für die Schiffspassage erforderlich, damit zum Einen die Schwallwelle besser genutzt werden konnte und diese sich zum Anderen nicht unnötig durch eine verzögerte Abflussteigerung in die Länge zog und somit abflachte.

Hogrewe hat versucht, durch den Einbau von erstmalig an der Stecknitzfahrt eingesetzten Stemmtoren⁸¹ bei der Reparatur der Dücker-schleuse im Jahr 1789 diese Zeitspanne zu verkürzen. Von Behrens wird diese Konstruk-

tion der Stemmtore allerdings als fehlerhaft bezeichnet.⁸² Zwar ließen sich durch diese Konstruktion die auftretenden Wasserdruckkräfte leichter ins seitliche Auflager einleiten, konstruktionsbedingt sei allerdings anzunehmen, dass sich hierdurch eine Verlängerung der Schleusungszeit ergibt.

Die Flügel der Stemmtore sind aufgrund ihrer Verdrehung bei gleicher Torbreite breiter als diejenigen der „einfachen“ Schleusentore. Zudem ist zu beachten, dass bei den Stemmtoren der Flügelrahmen bis in die Mitte des Fließquerschnitts reicht. Hieraus ergibt sich, bezogen auf den Drehpunkt der Torflügel, ein wesentlicher Unterschied zwischen beiden Torarten: Die aufzubringende Kraft, um die Torflügel entgegen einer (Rest-)Strömungskraft zu öffnen, ist bei demjenigen Tortyp geringer, der auf diese Weise den kürzeren Abstand zwischen Drehpunkt und äußerstem Rahmenstab hat. Nicht zuletzt hat die Breite der Torflügel aufgrund der Spannweite einen

⁸¹ Der Einbau der Stemmtore an der Dücker-schleuse im Jahr 1789 wird von Hogrewe selbst als Neuerung an der Stecknitzfahrt bezeichnet, obschon spätestens seit Anfang des 16. Jahrhunderts Stemmtore in Europa (Italien und Niederlande) bekannt gewesen sind (vgl. Eckholt 1949, 255 und Wreden 1919, 12 ff.)

⁸² Behrens 1818, 13.

Einfluss auf die erforderliche Tragfähigkeit der verwendeten Rahmenhölzern. In beiden Fällen dürften sich die Schleusentore mit Schleusenbaum als vorteilhaft erwiesen haben. Zu beachten ist allerdings, dass die Stemmtore lediglich vier (statt fünf) Schüttbretttafeln besessen haben. Auch entfällt das „Entfernen“ des Schleusenbaumes. Diese beiden Aspekte sprechen für eine verkürzte Schleusungszeit bei den Stemmtoren und somit für einen geringeren Wasserverlust.

Weshalb die Schleusentore mit Schleusenbaum an der Stecknitzfahrt bis zuletzt häufiger im Betrieb blieben und weshalb sich die Stemmtore nach deren Einführung durch Högrewer nicht durchsetzen konnten, muss offen bleiben. Vielleicht haben die verantwortlichen Baumeister aufgrund fehlender Erfahrung auf die Verwendung der Stemmtore verzichtet.

3.3 Schwall- und Sunkwellen infolge Schleusungsvorgängen an den Stauschleusen

Wurden die Tore einer Stauschleuse geöffnet, so kam es zu einer Schwallwelle im Unterwasser (Füllschwall). Auf der anderen Seite kam es zu einem Sunk im Oberwasser, da sich infolge der großen Wasserspiegeldifferenz eine große Wassermasse ins Unterwasser ergoss (Entnahmesunk). Umgekehrt war es beim Schließen der Tore: In das Unterwasser wanderte eine Sunkwelle aufgrund des relativ abrupten Abreißens des Wasserzuflusses (Absperrunk). Oberwasserseitig entstand eine Welle, die aus der Reflexion des zufließenden Wassers an dem nunmehr geschlossenen Schleusentor resultierte (Absperrschwall). Diese Welle wanderte in das Oberwasser. Durch Reflexion der durch den Schleusungsbetrieb verursachten Schwall- und Sunkwellen an den jeweils ober- oder unterwasserseitig gelegenen Toren der nächsten Schleuse konnte es zu einer Überlagerung der Wellen kommen (Stehende Welle).⁸³

⁸³ Tatsächlich kommt eine (perfekte) Stehende Welle nur dann zustande, wenn die Frequenz und die Amplitu-

Zur möglichen Häufigkeit der Schleusungen aufgrund des begrenzten Wasserdargebotes wird seitens Woltmann angemerkt:

*„Zu den Hauptmängeln dieses Canals hat man zu rechnen dessen geringe Tiefe und Breite, [...] und die Eigenthümlichkeiten der vorhandenen Stauschleusen, deren jedesmaliger Verbrauch den Aufwand des ganzen versammelten Wasservorraths und daher den Zeitraum mehrerer Tage zum Wiederansammeln des Wasser erfordert.“*⁸⁴

Auch Behrens geht auf den wasserwirtschaftlichen Missstand, der durch den Betrieb der Stauschleusen hervorgeht, ein:

*„Obgleich das sumpfige Stecknitzthal reichhaltige Quellen und viele andere Zuflüsse hat, so können sie doch nur erst in mehreren Tagen ersetzen, was durch die so schädlichen Stauschleusen in wenigen Stunden verschwendet wird, daher ist beinahe immer, und vorzüglich im Sommer, wo die Schiffahrt am lebhaftesten ist, Mangel an Wasser im Kanal.“*⁸⁵

Inwieweit die Angaben von Woltmann und Behrens in diesem Zusammenhang zutreffend sind, hängt sicherlich von der Lage der jeweiligen Stauschleuse und der daraus resultierenden Größe des Einzugsgebietes mit den hieraus folgenden Zuflüssen ab.

Über die Größe der Schwallwelle nach dem Öffnen der Schleusentore im Unterwasser schreibt Rehder:

„Die abfließende Stauwelle füllt allmählich das Flussbett und kommt dann wider allmählich zum Sinken; der dadurch an jeden zweiten Tage wiederkehrende Wechsel in der Höhe des Wasserstandes im Flussbett beträgt z. B. auf der Strecke von der Berkenthiner Schleuse abwärts in trockenen Zeiten und bei

de zweier gegenläufiger Wellen exakt gleich groß sind. Die Amplituden der Einzelwellen summieren sich in den Schwingungsbäuchen; an den Schwingungsknoten löscht sich die Amplitude aus. Unter Berücksichtigung von Reflexionsverlusten wird dieses Phänomen bei Wasserwellen auch als partielle Clapotis bezeichnet.

⁸⁴ Woltmann 1826, 172.

⁸⁵ Behrens 1818, 3.

reinem Flussbett rund 0,80 m, in nassen Zeiten und bei stark verkrautetem Flussbett erheblich weniger.⁸⁶

Bei verkrautetem Ufern ist die hier angesprochene Wasserstands-differenz geringer, da infolge der Reibungseinflüsse die ablaufende Stauwelle länger und flacher wird. Ähnlich verhält es sich „in nassen Zeiten“: Hier ist davon auszugehen, dass sich in langanhaltenden Regenwetterperioden in der Stecknitz ein natürlicher höherer Wasserstand infolge von größeren Grund- und Oberflächenwasserzuflüssen eingestellt hat (höhere Abflussspende). Werden nun die Schleusentore geöffnet, ist die Wasserspiegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser geringer, was eine flachere Welle zur Folge hat.

Die Höhe der Schwallwelle wird von Rehder mit 80 cm an der Berkenthiner Schleuse bei einem Gefälle von 1,88 m angegeben.⁸⁷

Der von Rehder beschriebene alle zwei Tage wiederkehrende Wechsel in der Wasserstandshöhe weist auf die Regelung der sog. Zapfel-tage hin (vgl. Abs. 5.2). An der Stecknitzfahrt war es die Regel, die Schleusen alle zwei Tage zu öffnen.

3.4 Schiffstypen und Querprofile

Mit der Urkunde von 24. Juni 1390 zur Einrichtung der Stecknitzfahrt⁸⁸ sollte die maximale Größe der Schiffe auf der Stecknitzfahrt derjenigen entsprechen, welche bereits zuvor auf der Stecknitz zwischen Lübeck und Mölln verkehrten. Hierbei handelte es sich um Prähme mit einer Länge von etwa 10 bis 12 m, einer Breite von rund 2,5 m und einem Tiefgang von bis zu 40 cm. Im Laufe der Zeit

wurden die Abmessungen der Schiffe entsprechend den wirtschaftlichen Anforderungen sowie den technischen Möglichkeiten vergrößert und der Kanal musste dafür ausgebaut werden (Tab. 1).

Zeitraum	Bezeichnung	Abmessungen
1398-1527	Prahm	Länge 10,0 - 12,0 m
		Breite 2,50 m
		Tiefgang bis 0,40 m
		Ladung 7,5 to
1527-1828	Buddenkahn 1	Länge ca. 19,0 m
		Breite 3,20 m
		Tiefgang 0,43 m
		Ladung 12,5 to
1828-1845	Buddenkahn 2	Länge ca. 19,0 m
		Breite 3,50 m
		Tiefgang 0,65 m
		Ladung 20,0 to
1845-1898	Stecknitzkahn	Länge 23,0 m
		Breite 4,31 m
		Tiefgang 0,87 m
		Ladung 35,0 bis 37,0 to

Tab. 1: Schiffstypen und Abmessungen (Zusammenstellung nach: Rehder, 1890; Woltmann, 1826; Behrens, 1818; Müller, 2002).

Die Zeit des sog. Buddenkahns setzte mit der ersten Beladungsverordnung für die Stecknitzschiffe von 1527⁸⁹ ein. Sie sah vor, dass die Schiffe mit maximal 250 Zentnern (= 12,5 to) bei einem Tiefgang von 18 Zoll (etwa 43 cm) beladen werden sollten. Im Boden sollten die Schiffe maximale Abmessungen von 19 m Länge und 3,25 m Breite haben. Woltmann gibt für die erste Hälfte des 19. Jh. die Länge der Schiffe mit 64 Fuß (ca. 18,60 m) und die Breite mit 12 Fuß (ca. 3,50 m) bei einem Tiefgang von 2,25 Fuß (ca. 0,65 m) an.⁹⁰

Ausgehend von der Annahme eines Trapezprofils und unter Berücksichtigung von erforderlichen Sicherheitsabständen bei der Schiffsbegegnung können Kanalprofile rekonstruiert werden (Abb. 7).

⁸⁶ Rehder 1890, 633.

⁸⁷ Mit dem Gefälle bezeichnet Rehder die Differenz zwischen der maximalen Stauhöhe an den Schleusentoren und dem niedrigsten schiffbaren Wasserstand (vgl. Rehder 1890, 630).

⁸⁸ vgl. Fußnote 1.

⁸⁹ Rehder 1892, 2.

⁹⁰ Woltmann 1826, 171.

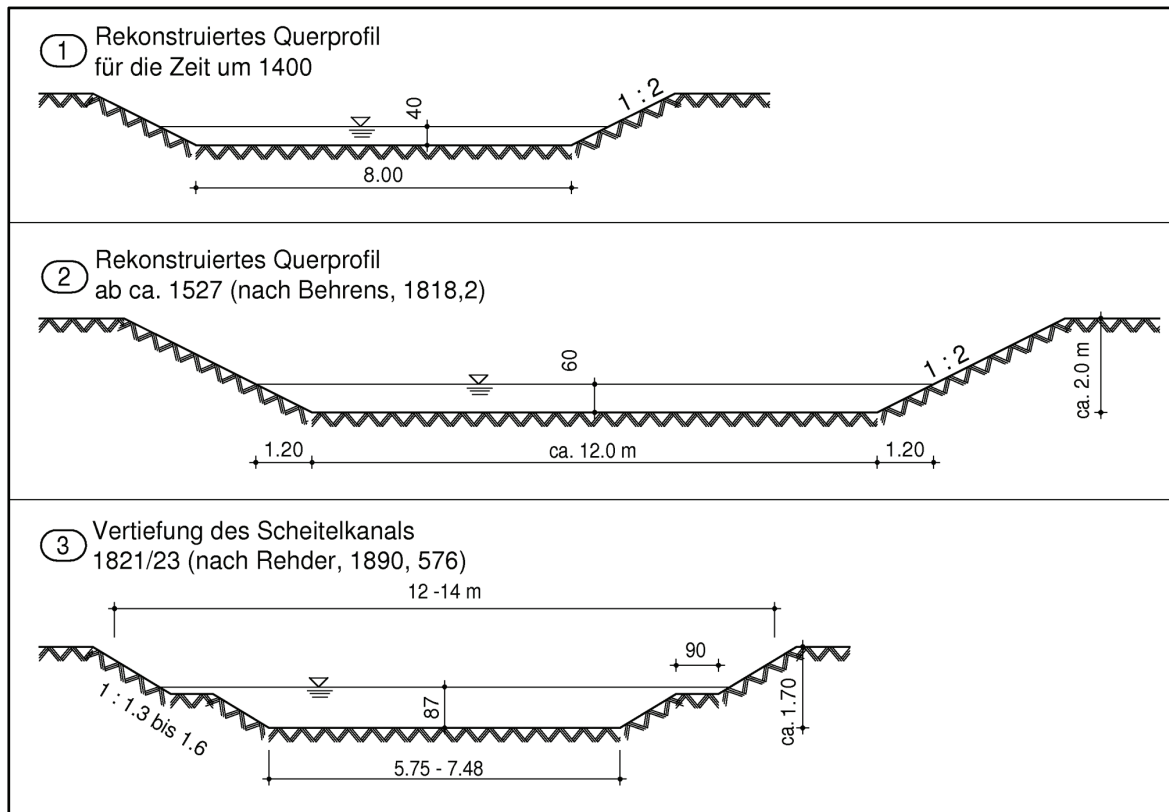


Abb. 7: Rekonstruierte Querprofile (angeben ist jeweils die Mindestwassertiefe nach Tab. 1, welche für die Aufrechterhaltung der Schifffahrt erforderlich war).

Zu Beginn der Stecknitzfahrt ist demnach eine Sohlbreite von rund 8 m anzunehmen. Für die Generation des Buddenkahns (ab ca. 1527) ergibt sich ein Kanalprofil mit einer Sohlbreite von rund 12 m und einer Böschungsneigung von 1 : 2 (Nr. 2 in Abb. 7). Diese Aussage deckt sich mit den Angaben von Behrens. Demnach betrage die mittlere Breite des Kanals 50 Fuss (ca. 14,55 m) bei einer Höhe der Uferböschungen über der Sohle von 6 bis 7 Fuss (knapp 2 m; Nr. 2 in Abb. 7).⁹¹ Zwar sollten sich auf gesamter Strecke zwei Schiffe begegnen können, um einen möglichst

ungehinderten Schifffahrtsbetrieb zu gewährleisten.⁹² Allerdings verweist Rehder darauf, dass „nach Ausweis der Aufmessungen aus späterer Zeit“⁹³ das dafür erforderliche Querprofil nicht im gesamten Bereich des Scheitelkanals erreicht wurde.

In den Jahren 1821 bis 1823 erfolgte eine Vertiefung des Scheitelkanals. Die Wassertiefe wurde danach mit 5 Fuss (1,45 m), die Sohlbreite mit 20 Fuss (5,75 m) in Einschnitten und 26 Fuss (7,48 m) in sonstigen Lagen angegeben. Die Uferböschungen wiesen eine Neigung von 1 : 1,66 in Sand und 1 : 1,33 in Tonboden auf. Bei einer 2 bis 3 Fuss (ca. 60 bis 90 cm) breiten Berme in den Ufern betrug die Wasserspiegelbreite demnach 12 bis 14 m (Nr. 3 in Abb. 7).⁹⁴

⁹¹ Behrens 1818, 2 – Unter Berücksichtigung eines erforderlichen Freibordes folgt auch für diese Angabe (je nach Böschungsneigung) eine Sohlbreite von rund 12 m.

⁹² Boehart et al. 1998, 6.

⁹³ Rehder 1890, 574.

⁹⁴ Rehder 1890, 576.

Offenbar war also das Querprofil in der Scheitelhaltung auch nach der Vertiefung in den 1820er Jahren kleiner als in den übrigen Haltungen. Dieser Umstand ist vor allem auf das kleine Einzugsgebiet der Scheitelhaltung und den daraus resultierenden, kleinen Zuflüssen sowie vermutlich dem wesentlich geringeren auszugrabenden Bodenvolumen zurückzuführen. Aus wasserwirtschaftlichen Aspekten führte ein kleineres Kanalprofil zu einem kleineren Schleusenwasserverlust an den Stauschleusen. Es wurde eine kürzere Dauer benötigt, um den ursprünglichen Wasserstand durch natürliche Zuflüsse abermals zu erreichen. Schließlich waren zunächst die Zienburger Schleuse und später die Hornbeker Schleuse als südlicher Abschluss der Scheitelhaltung bis 1830 „Wasser verschwendende“ Stauschleusen.

Einerseits ist davon auszugehen, dass die früheren Baumeister durchaus versucht haben, den Scheitelkanal in der Weise auszubauen, dass auch hier zwei Schiffe einander passieren konnten. Schließlich war es spätestens seit dem Bau der Grambeker Kammerschleuse (1830) möglich, den Wasserstand auf der beidseitig durch Kammerschleusen eingefassten Scheitelstrecke zu kontrollieren bzw. den Wasserverlust durch Schleusungsvorgänge zu minimieren. Andererseits ist anzumerken, dass die Bestrebungen seitens Hogrewe Anfang des 19. Jahrhunderts, den Kanalquerschnitt im Einschnittbereich zwischen der Delvenau und dem Möllner See zu vertiefen und zu verbreitern, am sandigen Boden und den nachrutschenden Hängen scheiterten.⁹⁵

4. Hydrologische Randbedingungen

Grundlage für jegliche Simulation von Fließvorgängen ist die Kenntnis des Abflusses [m^3/s], der angibt, wie viel Wasser in einer bestimmten Zeiteinheit einen Gewässerab-

schnitt passiert. Insbesondere wenn die Wasserbilanz in die Untersuchungen einbezogen wird, muss die Größe des Zuflusses bekannt sein.

Zwei wesentliche Faktoren (die Größe des Einzugsgebietes [km^2] und die Abflussspende [$l/(s \cdot \text{km}^2)$]) bestimmen den jeweiligen Abfluss eines Gewässers. Während die Größe des Einzugsgebietes in erster Linie durch die Topografie des Geländes bestimmt ist, hängt die Abflussspende von den Eigenschaften des Einzugsgebietes und der saisonalen Niederschlagsverteilung ab und ist daher wesentlich differenzierter zu betrachten.

Die Größe der historischen Teileinzugsgebiete (bestimmt durch die einzelnen Nebenbäche von Stecknitz und Delvenau) wurden von Rehder angegeben.⁹⁶ Diese wurden mit heutigen Werten verglichen und zeigten eine gute Übereinstimmung (Tab. 2), was zu erwarten war, denn die Topographie hat sich in gut 100 Jahren nicht wesentlich verändert. Ein Abgleich mit historischem Kartenmaterial wies ebenfalls ähnlich große Einzugsgebiete aus.⁹⁷ Für die Simulation (Abs. 8) wurde daher auf die Angaben Rehders zurückgegriffen. Für die Scheitelhaltung ergibt sich somit gem. Tab. 2 eine Einzugsgebietsgröße von $31,4 \text{ km}^2$ (Priesterbach bei Station 43+900).

Abflussspenden sind während eines Jahres nicht konstant, da sie durch die Niederschläge und deren Intensität bestimmt werden. Während der trockenen Sommermonate sind sie deutlich geringer als in feuchten Wintermonaten. Ebenso hat die geomorphologische Struktur und die Oberflächennutzung im Einzugsgebiet Einfluss auf die Abflussbildung.

Anhand von Messreihen bestehender Pegel konnte eine Abschätzung der Abflussspende der historischen Stecknitzfahrt erfolgen. Zum Vergleich wurden Pegeldata von Gewässern

⁹⁵ Rehder 1890, 576: Die Scheitelhaltung sollte unter der Leitung von Hogrewe ab 1802 auf eine Breite von rund 11,5 m bei einer Tiefe von etwa 1,7 m ausgebaut werden.

⁹⁶ Rehder 1892, 10f.

⁹⁷ Es erfolgte ein Abgleich mit digitalisierten Messtischblättern der Preußischen Landesaufnahme (Erstausgabe) aus den Jahren 1877/80. Vermutlich hat auch Rehder diese Karten zur Bestimmung der Einzugsgebietsgrößen verwendet.

	Zufluss		Station (etwa)	EZG-Größe [km ²]	
	nach Rehder	heutiger Name ^{*1)}	[km]	nach Rehder	heute ^{*2)}
Delvenau	Kintemühlen Bach	(?) ^{*6)}	3+100	13.82	
	Linau	Linau	16+100	104.92	110.49
	Bröthener Bach	Riedebeck ^{*3)}	16+500	19.15	35.22
	Steinau	Steinau (Büchen)	19+800	93.55	93.91
	Roseburger Mühlenbach	Gethsbek	29+600	10.97	16.38
	Priesterbach	Priesterbach	43+900	31.42	30.24
	Möllner See	Möllner See ^{*4)}	51+400	114.04	
Stecknitz	Alt-Möllner Mühlenbach	Mühlenbach ^{*5)}	52+500	34.78	10.83
	Pirschbach	Pirschbach	53+900	23.66	24.43
	Steinau	Steinau (Nusse)	55+500	82.71	82.03
	Riemanns Mühlenbach	Mühlenbach	zwischen 59+800 und 71+500	7.32	9.81
	Kühsener Bach	Mühlenbek		7.92	7.99
	Ankerscher Mühlenbach	(NN)		2.44	2.79
	Behlendorfer Bach	Behlendorfer Bach		6.94	6.59
	Hollenbek	Wahlbek		7.28	7.58
	Göldenitz	Diekbek		14.61	13.81
	Rondeshagener Bach	Mühlenbach	76+700	4.50	4.70
	Brömbesenmühlenbach	Brömbesenmühlenbach	79+100	14.41	17.80
	Born-Mühlenbach	(?) ^{*6)}		3.83	
	Grinau	Grinau	86+200	45.81	47.94

^{*1)} Gemäß Digitalem Flächenverzeichnis (DAV), Stand November 2008.
^{*2)} Gemäß Gewässerkundlichem Flächenverzeichnis (GFV), Stand November 2008.
^{*3)} Die Zuordnung ist nicht eindeutig, da der heutige Verlauf des Elbe-Lübeck-Kanals (ELK) von der Stecknitzfahrt in diesem Bereich abweicht.
^{*4)} Der Möllner See hat div. Zuflüsse.
^{*5)} Der Möllner Mühlenbach wurde offensichtlich durch den Bau des ELK verlegt.
^{*6)} Nicht im derzeitigen DAV verzeichnet.

Tab. 2: Einzugsgebietsgrößen (nach Rehder 1892, 10 f., 67; abgeglichen mit dem Gewässerkundlichen Flächenverzeichnis [GFV] und dem Digitalen Anlagenverzeichnis [DAV] des Landesamtes für Natur- und Umweltschutz Schleswig-Holstein [LANU-SH], Stand November 2008). Geringfügige Änderungen der Einzugsgebietsgrößen können auch aus dem Bau des Elbe-Lübeck-Kanals resultieren.

herangezogen, die östlich und westlich der Stecknitzfahrt verlaufen und aufgrund der Struktur ihres Einzugsgebietes ähnlich denen der Stecknitzfahrt sein dürften.

Dafür stehen im östlichen Bereich Daten des Pegels Schwartow an der Boize (Mecklenburg-Vorpommern) zur Verfügung. Das Einzugsgebiet der Boize erstreckt sich östlich der Delvenau von Höhe des Scheitelkanals südlich bis hin zur Elbe und bietet bei ähnlichen geomorphologischen Verhältnissen eine räumliche Nähe zur Stecknitzfahrt. Im west-

lichen Bereich können die Daten der Linau (Pegel Witzeze) herangezogen werden.

Das Einzugsgebiet reicht von Geesthacht bis nach Witzeze. Es ist durch eine sehr flache Topografie sowie viele dezentrale (moderne) Rückhaltmaßnahmen gekennzeichnet und ist daher nur bedingt repräsentativ für das Einzugsgebiet der historischen Stecknitzfahrt. Auch die Bille (Pegel Sachsenwaldau) verläuft westlich der Stecknitzfahrt. Ihr Einzugsgebiet ist durch einen hohen Waldanteil (Sachsenwald) gekennzeichnet und weist eine

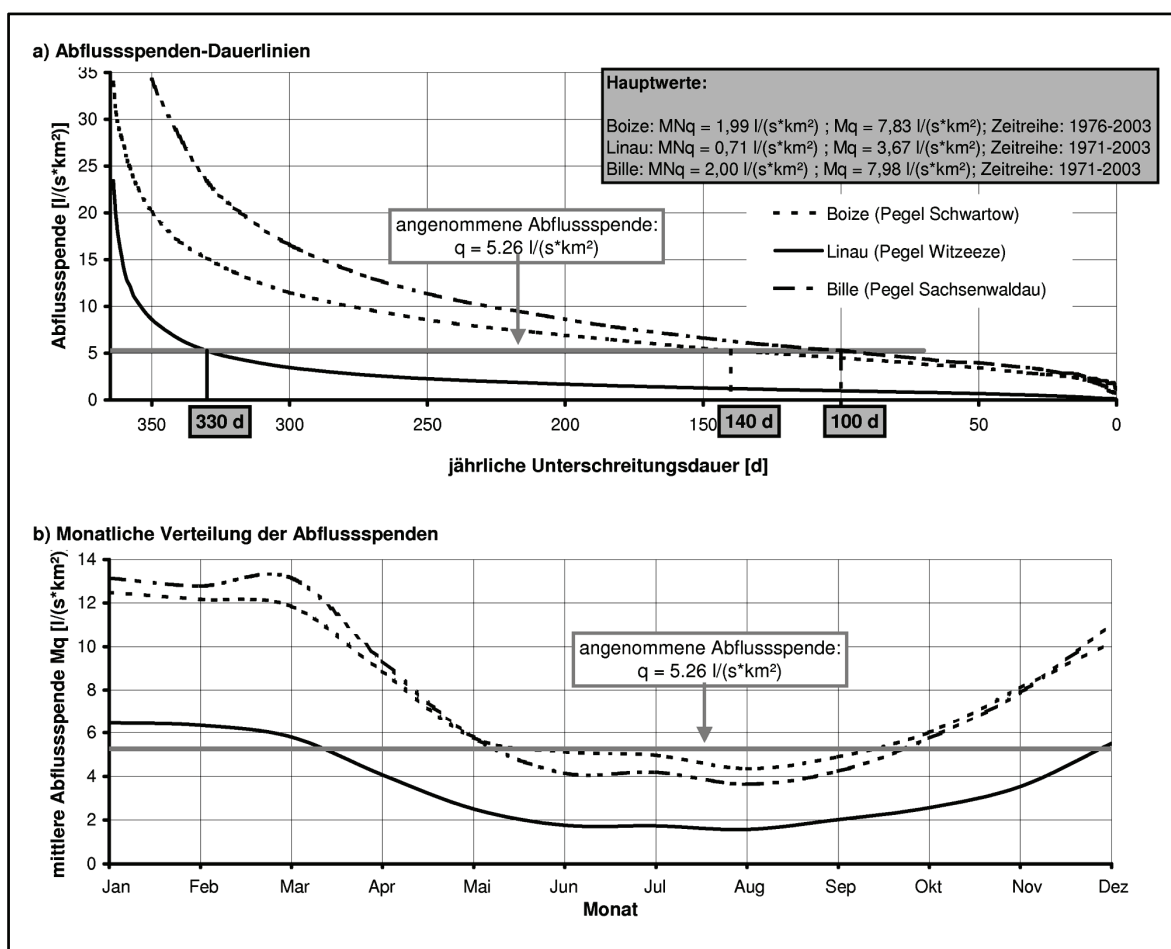


Abb. 8: a) Abflusspenden-Dauerlinie: Angegeben ist die jährliche Anzahl von Tagen, an denen eine bestimmte Abflusspende unterschritten wird. b) Monatlicher Verlauf der mittleren Abflusspenden (Mq) über einen Jahreszeitraum (Datengrundlage: FHH 2003).

vergleichbare Geomorphologie auf. Für diese Pegel liegen Messreihen für die letzten etwa 30 Jahre einschließlich entsprechender statistischer Auswertung vor.⁹⁸ Es wird angenommen, dass sich die Abflussbildung für diesen Zeitraum gegenüber dem historischen Zustand nur unwesentlich geändert hat. (In Abb. 8a sind die Dauerlinien der zuvor beschriebenen Pegel dargestellt.) In Anlehnung an Bähr 2001 wurde für die Simulation (Abs. 8) eine Ab-

flusspende von $q = 5,26 \text{ l/(s} \cdot \text{km}^2)$ gewählt.⁹⁹ Diese Abflusspende wird danach etwa an gleich vielen Tagen pro Jahr über- und unterschritten (Anzahl der Tage pro Jahr mit einem geringeren Abfluss: an der Bille etwa 100 Tage, an der Boize etwa 140 Tage).¹⁰⁰ Die Mittelwasserabflusspenden betragen für diese beiden Pegel $Mq = 3,67$ bzw. $7,83 \text{ l/(s} \cdot \text{km}^2)$. Die gewählte Abflusspende fügt sich gut in diese Werte ein.

⁹⁸ Die Pegeldata wurden dem Gewässerkundlichen Jahrbuch 2003 (FHH 2003) entnommen. Die Hauptwerte und die Dauerlinien beziehen sich auf Zeitreihen von 1971-2003 (Linau und Bille) bzw. 1976-2003 (Boize).

⁹⁹ Bähr 2001, 42, Tab. 20.

¹⁰⁰ Die Abflusswerte der Linau sollten aufgrund der offensichtlich modernen, anthropogenen Beeinflussung nicht für die Simulation eines historischen Zustandes berücksichtigt werden.

Die jahreszeitliche Verteilung der monatlichen mittleren Abflussspenden (Abb. 8b) zeigt, dass die gewählte Abflussspende in der Sommermonaten bei allen drei Gewässern, am deutlichsten an der Linau, unterschritten wird. Der gewählte Wert entspricht somit einen Mittelwasserabfluss, der für die Monate Mai/Juni und September/Okttober repräsentativ ist.

5. Betriebliche Aspekte

Aus der betrieblichen Situation können hilfreiche Schlüsse für die Kalibrierung eines numerischen Modells abgeleitet werden. So gestattet beispielsweise die Anzahl der durchgeführten Schleusungsvorgänge Rückschlüsse auf den Wasserverlust bei Schleusen. Des Weiteren kann aufgrund von Wasserstandsbeobachtungen das Modell verifiziert werden.

5.1 Dauer der Fahrt

Die Fahrt von Lauenburg nach Lübeck war äußerst beschwerlich und zeitraubend. In der Regel mussten die Schiffe vor den Stauanlagen warten, bis diese geöffnet wurden und passiert werden konnten (vgl. Abs. 5.2). Bergfahrende Schiffe mussten zudem mühsam durch Linentrecker (oder: Leinenzieher) gegen die Strömung gezogen (getreidelt) werden. Hierzu wurden beidseits der Wasserstraße Treidelpfade angelegt. Die Fahrt dauerte daher rund drei Wochen. Behrens vermerkt hierzu:

*„Geht daher die Fahrt rasch, so wird sie von Lübeck bis Lauenburg in 10 Tagen zurückgelegt, diese Zahl wächst aber gewöhnlich bis 20 an [...]“*¹⁰¹

Woltmann hingegen differenziert, dass die Dauer der Fahrt von Lauenburg nach Lübeck vom Wasserangebot abhängig sei:

„Bey allen Schleusen sind zum gleichzeitigen Durchgange aller versammelten Böte und zum Behuf des Wiederansammelns des erforderli-

*chen Wasservorraths gewisse Fahreltage [Zapfeltage] festgesetzt; welche Bestimmung aber manche Abänderung leidet, je nachdem Ueberfluß oder Mangel an Wasser eintritt. Die Fahrt kann bei vollem Wasser in 10 Tagen nach Lauenburg und in 12 Tagen von Lauenburg geschafft werden; häufig werden aber dazu 14 Tage bis 3 Wochen erfordert.“*¹⁰²

Eine wesentliche Verbesserung dürfte sich aus der Einrichtung der Hornbeker (später: Grambeker; vgl. Abs. 2.2.2) Schleuse Ende des 17. Jh. ergeben haben. Durch ihren Bau wurde die Scheitelstrecke von rund 12 auf 8 km verkürzt, wodurch der Wasserstand möglicherweise einfacher auf einem schiffbaren Stand zu halten war (vgl. Abs. 2.2). Müller merkt hierzu an:

*„Schon durch den ersten Bau dieser Schleuse [die Hornbeker Stauschleuse] trat eine wesentliche Zeitverkürzung für die gesamte Stecknitzfahrt ein. Während im früheren Zeiten vier bis sechs Wochen für eine Fahrt Lübeck-Lauenburg benötigt wurden, kam man jetzt mit zwei bis drei Wochen aus.“*¹⁰³

Als wichtiger Aspekt für die Verkürzung der Fahrtzeit kann die Einführung der Reihefahrt (oder: Gruppenschiffahrt) angesehen werden. Wie Rehder ausführt, sei seit Einführung dieser Regelung die *„Reise von Lübeck nach Lauenburg, welche früher 3 bis 5 Wochen oder mehr andauerte, in 14 oder 16 Tagen“*¹⁰⁴ zu absolvieren. Die Anzahl der Schleusungen und somit der Wasserverlust konnten bei einer gleichen Gesamtanzahl geschleuster Schiffe aufgrund der Reihefahrt reduziert werden.

¹⁰² Woltmann 1826, 172.

¹⁰³ Müller 2002, 32 – Ob tatsächlich allein durch die Einrichtung der Hornbeker Stauschleuse eine derartige Zeitverkürzung eintrat, ist aus Sicht des Verfassers fraglich. Möglicherweise trat eine Verbesserung der Schifffahrtsbedingungen in der Scheitelhaltung ein (vgl. Abs. 2.2), eine Halbierung der gesamten Fahrtzeit zwischen Lübeck und Lauenburg scheint allerdings unwahrscheinlich.

¹⁰⁴ Rehder 1890, 592.

¹⁰¹ Behrens 1818, 4.

5.2 Wasserstandsregelung

Behindert wurde die Schifffahrt dadurch, dass die bergfahrenden Stecknitzfahrer es oft nicht schafften, auf der Schwallwelle zur nächsten Schleuse zu gelangen. Sie mussten dann warten, bis das oberwasserseitige Wehr wieder geöffnet wurde und somit die weitere Schifffahrt ermöglichte. Behrens erläutert diesen Umstand am Beispiel der etwa 12,8 km langen Haltung zwischen der Donnerschleuse und der Berkenthiner Schleuse, welche aber stellvertretend für alle anderen längeren Haltungen steht:

*„Sollen z. E. Schiffe durch die Donnerschleuse gehen, um abwärts nach Lübeck zu fahren, so werden nachdem zwischen dieser und der Oberschleuse hinreichend Wasser gesammelt worden, die Thüren jener Schleuse geöffnet, und der über eine Meile [tatsächlich etwa 12,8 km] lange Tractus des Kanals bis Berkenthin wird so hoch mit Wasser gefüllt, dass sie im Stande sind zu der dort befindlichen Schleuse zu gelangen. Jetzt können freilich auch Schiffe von Berkenthin aufwärts gehen, aber bei der Donnerschleuse angelangt, finden sie kein Wasser mehr zur weiteren Fahrt; sie müssen dort anlegen und die Ankunft neuer Gewässer abwarten. Häufig tritt dennoch der Fall ein, dass das Wasser wegen des starken Gefälles früher abläuft, bevor sie eine Schleuse erreicht haben, so sie alsdann liegen bleiben. [...] Dies Spiel wiederholt sich jeden dritten Tag der Woche [...] welche Zapfeltage genannt werden.“*¹⁰⁵

Offenbar war es Praxis, nachdem die Stauschleusen bereits wieder geschlossen waren, durch mehrmaliges „Nachschicken“ von Wasser eine verlängerte Schwallwelle anzustreben.¹⁰⁶ Auf diese Weise sollte insbesondere den talfahrenden Schiffen eine ungehinderte Fahrt bis zur nächsten Schleuse ermöglicht werden.

Auf der Stecknitzfahrt fand keine Regelung hinsichtlich Pegelmarken o. ä. statt. Von Woltmann wird hierzu vermerkt:

*„Uebrigens findet man nicht, daß zur bestimmten Regulierung des Wasserstandes Peilmaaß[?]en bey den Schleusen angebracht oder verordnet sind, wonach Schleusenmeister und Schiffer sich richten müssten, sondern das Nachschicken von Wasser scheint in so ferne der Willkühr der Schleusenmeister und Schiffer überlassen zu sein, als sie deswegen ihre eigne Maaßen und Merkmale haben.“*¹⁰⁷

Da aber bestimmte Zapfeltage festgeschrieben waren, war der Betrieb der Stecknitzfahrt nicht gänzlich der Willkür der Schleusenmeister ausgeliefert. An den Zapfeltagen – in der Regel jeden zweiten Tag – sollten die Schleusen ihre Tore öffnen. Da die aufeinander folgenden Schleusen jeweils unterschiedliche Zapfeltage hatte, sollte ein möglichst reibungsloser Betrieb gewährleistet werden.

*„Eine gleiche Verwandnis hat es mit den sog. Zapfeltagen, an welchen die Schütten gezogen werden und die Schleusen-Thüren zur Passage der Schiffe geöffnet werden, welches nach der Regel in der Woche dreymal bey den Hauptschleusen geschieht, [...]“*¹⁰⁸

In Tab. 3 sind die Zapfeltage nach Angaben Rehders und Woltmanns gegenübergestellt. Hierbei fällt auf, dass Rehder wesentlich differenzierte Angaben macht und auch zwischen Berg- und Talfahrern unterscheidet. Der Unterschied ist durch 1845 und 1874 in Kraft getretene Polizeiverordnungen über diese Festsetzungen zu erklären.¹⁰⁹ Inwieweit die Zapfeltage in dieser Weise tatsächlich zur Anwendung kamen, ist allerdings fraglich, da den Schleusenmeistern frei stand, bei ausreichend Wasser auch außerhalb der Zapfeltage zu schleusen.¹¹⁰ Dieses dürfte allerdings nur in den abflussreichen Wintermonaten der Fall gewesen sein (vgl. Abs. 4, Abb. 8b).

¹⁰⁵ Behrens 1818, 3f.

¹⁰⁶ Woltmann 1826, 190; Wreden 1919, 19f. – dort auch Verweis auf Hogrewe, wonach das Volumen des eigentlichen Wasserverlustes während der Schließung etwa ein Viertel dieses „nachgeschickten“ Wasser beträgt.

¹⁰⁷ Woltmann 1826, 190.

¹⁰⁸ ebd.

¹⁰⁹ Zusammenfassungen dieser Polizeiverordnungen finden sich bei Rehder 1890, 632 f.

¹¹⁰ Rehder 1890, 632

	nach: Woltmann, 1826	nach: Rehder, 1890
Berkenthiner Schleuse:	dienstags, donnerstags, samstags	dienstags, donnerstags, samstags
Donnerschleuse:	montags, mittwochs, freitags	montags, mittwochs, freitags
Oberschleuse:	dienstags, donnerstags, samstags	dienstags, donnerstags, samstags
Hahnenburger Schleusen:	montags, mittwochs, freitags	täglich
Grambeker Schleuse:	--- keine Angabe ---	täglich
Zienburger Schleuse:	montags, mittwochs, freitags	montags, mittwochs, freitags
Seeburger Schleuse:	dienstags, donnerstags, samstags	Talfahrer: montags, mittwochs, freitags Bergfahrer: montags, mittwochs, freitags, samstags
Siebeneichener Schleuse:	--- keine Angabe ---	Talfahrer: montags, mittwochs, freitags Bergfahrer: montags, mittwochs, freitags, samstags
Büchener Schleuse:	montags, mittwochs, freitags	Talfahrer: dienstags, donnerstags, samstags Bergfahrer: montags, mittwochs, donnerstags, samstags
Niebuhrschleuse:	--- keine Angabe ---	dienstags, donnerstags, samstags
Dückerschleuse:	--- keine Angabe ---	Talfahrer: dienstags, donnerstags, samstags Bergfahrer: montags, dienstags, donnerstags, samstags
Palmschleuse:	--- keine Angabe ---	Talfahrer: montags, mittwochs, freitags Bergfahrer: montags, dienstags, donnerstags, samstags
Frauweiderschleuse:	--- keine Angabe ---	täglich

Tab. 3: Zapfeltege, an denen die Schleusen geöffnet wurden (nach: Woltmann 1826, 190 und Rehder 1890, 632).

Anhand von Pegeldaten¹¹¹ für den Zeitraum 1889 bis 1891 lässt sich keine Korrelation zwischen den von Rehder angegebenen Zapfeltegen und den festgestellten Wasserständen ausmachen. Allerdings wurden nur die höchsten, niedrigsten und durchschnittlichen Wasserstände für jeden Tag dokumentiert. Die zeitliche Auflösung dieser Daten ist für die Erfassung einer Schwallwelle nach der Schleusenöffnung nicht ausreichend. Für eine Kalibrierung des numerischen Modells sind diese Daten nicht verwendbar.

Teil B – Instationäre Simulation von Schleusungen an der Hahnenburger Schleusentreppe

6. Methode

6.1 Zieldefinition

Besonders problematisch für die Stecknitzfahrer war das geringe Wasserangebot insbesondere in den hoch gelegenen Haltungen, da diese sehr kleine Einzugsgebiete und somit geringen Zufluss aufwiesen.

In Tab. 4 sind neben den geometrischen Angaben der einzelnen Schleusen die Normalabflusstiefen¹¹² angegeben.

¹¹¹ Wasserstandsbeobachtungen für den Möllner See sowie für einige Schleusen an der Stecknitzfahrt liegen für den Zeitraum 1889 bis 1891 als Anlage zum Entwurf des Elbe-Trave-Kanals vor (Archiv der Hansestadt Lübeck, AHL, Packen 118/119).

¹¹² Die Berechnung der Normalabflusstiefen erfolgte nach der allg. Fließformel von Manning/Strickler mit den geometrischen Angaben aus Abb. 7, den hydrologischen Werten gem. Abs. 4 und Rauigkeitsbeiwerten von $k_{St} = 36 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

		Station [km]	EZG-Größe gem. Abs. 4 [km ²]	Sohlhöhe bzw. Drempl oben/unten [mNN]	max. Stauhöhe bzw. mittlerer Wasserspiegel [mNN]	Gefälle ^{*1)} [m]	Funktionsweise	Bauweise	Durchfahrtsbreite [m]	Kammerlänge/-breite [m]	Normalabflusstiefe [m] ^{*9)}	
	Lübeck, Holstenbrücke	98,370				-0,06						
	Mündung in die Trave	94,532		ca. -1,5		-0,06						
1	Stecknitz	Berkenthiner Schleuse	72,121	324,8	3,68	6,56	1,88 ^{*2)}	Stauschleuse	Holz	4,69	0,47	
2		Kleine Donnerschleuse	59,311		6,92	9,23	1,41	Stauschleuse	Holz	5,05	0,39	
3		Große Donnerschleuse	59,119	264,6	8,24	10,80	1,57 ^{*3)}	Stauschleuse	Stein	5,04	0,39	
4		Kleine Oberschleuse	55,721		9,73	11,34	0,49	Stauschleuse	Holz	5,00	0,26	
5		Große Oberschleuse	55,299	177,6	10,34	12,00	0,66 ^{*4)}	Stauschleuse	Holz	4,95	0,26	
	Möllner See		114,0			12,00						
6	Scheitelkanal	Stauschleuse in der Kehle	50,758		10,57	12,17	0,17	Stauschleuse	Stein	4,75	0,07	
7		Untere Hahnenburger	50,607		13,23 / 11,17	14,56	2,39	Kammerschleuse	Stein	4,66	36,80 / 16,50	0,07
8		Obere Hahnenburger	50,330	15,71 ^{*5)}	14,95 / 13,57	16,66	2,10	Kammerschleuse	Stein	4,78	38,10 / 24,00	0,07
9		Hornbeker Schleuse	42,300	15,71 ^{*5)}	14,96 / 13,79	16,66	1,34	Kammerschleuse	Stein	5,16	22,88 / 5,24	0,07
10		Zienburger Schleuse	38,990 ^{*5)}	21,9	13,69	15,31	0,70	Stauschleuse	Stein	4,89		0,08
11	Dalvenau	Seeburger Schleuse	36,220	28,6	12,81	14,61	1,50	Stauschleuse	Holz	5,12		0,14
12		Siebeneichener Schleuse	27,940	55,8	11,95 / 10,77	13,08	1,50	Kammerschleuse	Holz	5,00	28,45 / 15,80	0,18
13		Büchener Schleuse	22,360	71,8	9,86	11,35	0,94	Stauschleuse	unbekannt	5,20		0,17
14		Niebuhrschleuse	17,702	168,5	8,45	10,15	0,90	Stauschleuse	unbekannt	4,95		0,26
15		Dückerschleuse	15,512	293,7	7,52	9,12	0,54	Stauschleuse	Stein	5,05		0,44
16		Palmschleuse	2,082	307,9	4,77 / 3,56	6,31	1,48	Kesselschleuse	Stein	5,16	33,70 / 22,25	0,37
17		Frauweiderschleuse	0,640	307,9	2,96 / 2,08	4,83	0,12 ^{*6)}	Kammerschleuse	Stein	7,30	57,40 / 14,50	
	Mündung in die Elbe	0,000				MW: 4,94 / MNW: 4,21 ^{*10)}						

*1) Gemeint ist nach Rehder die Wasserspiegeldifferenz zwischen maximalen Stau und kleinsten schiffbaren Wasserstand.
 *2) Die Wasserspiegeldifferenz zwischen vollem Stau und abgelaufener Stauwelle betrug 2,26m.
 *3) Die Wasserspiegeldifferenz zwischen vollem Stau und abgelaufener Stauwelle betrug 3,45m.
 *4) Die Wasserspiegeldifferenz zwischen vollem Stau und abgelaufener Stauwelle betrug 1,50m.
 *5) Rehder nennt einen Abstand zwischen der Grambeker und der Zienburger Schleuse von 33,10km. Dieses ist offenbar ein Schreibfehler. Stattdessen wird eine Entfernung von 3,31km angenommen.
 *6) Rehder gibt ein normales Gefälle von 0,12m ab. Es könne allerdings je nach Wasserstand in der Elbe bis zu 1,81m betragen.
 *7) Kammerwände waren nach aussen geneigt.
 *8) Die Größe des Einzugsgebietes der Scheitelhaltung wurde zugleich auf beide Abschlusschleusen aufgeteilt
 *9) Berechnet für mittlere Abflussspende $M_q = 5,26 \text{ l/(s*km}^2\text{)}$, Sohlbreite 12 m, Böschungsneigung 1 : 2, Rauigkeitsbeiwert $k_{Sg} = 35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.
 *10) Hauptwerte für den Pegel Hohnstorf für die Zeitreihe 1996/2005 (entnommen aus dem Elektronischen Wasserstraßen-Informationssystem ELWIS www.elwis.de). Die heutigen Wasserstände werden allerdings durch das oberwasserseitige Elbwehr bei Geesthacht beeinflusst und können daher nur bedingt für einen Vergleich mit historischen Zuständen herangezogen werden.

Tab. 4: Geometrische Angaben, Höhenlage, Stationierung und Größe der Einzugsgebiete (ergänzt nach: Rehder 1890, 630; 1892, 16 f.).

Ein Vergleich mit der erforderlichen Mindestwassertiefe (Tab. 1) zeigt, dass die Schifffahrt nur durch einen Aufstauen bzw. durch die „Fahrt auf Schwellung“ möglich war. Im Folgenden soll anhand eines numerischen Berechnungsmodells ein instationärer Schleusungsvorgang für den besonders kritischen Kanalabschnitt im Bereich der Hahnenburger

Schleusentreppe (vgl. Abs. 2.2.1) modelliert werden, um beurteilen zu können, inwieweit die Schifffahrt tatsächlich unter Berücksichtigung der historischen Angaben möglich war und welche Konsequenzen sich hieraus für den Betrieb ergaben.

6.2 Anforderungen an das numerische Modell

Grundsätzlich ist zu beachten, dass ein physikalischer Vorgang durch mathematische Beziehungen beschrieben wird. Für die Auswahl des am besten geeigneten Berechnungsmodells ist daher die Kenntnis über die zu erwartenden physikalischen Vorgänge erforderlich. Um eine möglichst gute Simulation der Abflusszustände im Modell zu erreichen, ist dessen Kalibrierung erforderlich. Dieses erfolgt i. d. R. über den Vergleich von berechneten und gemessenen Pegelwerten. Liegen solche Daten nicht vor, muss das Modell anhand anderer Parameter kalibriert werden. Im vorliegenden Fall sind dies in erster Linie Angaben über den Betrieb der Schleusenanlagen.

Die tatsächliche Wasserspiegellage in der Scheitelhaltung verlief i. d. R. nicht horizontal. Dieses würde nur nach einer bestimmten Zeit zutreffen, wenn keine Zu- oder Abflüsse zur Kanalhaltung vorhanden sind (Stillgewässer). Etwaige Zu- oder Abflüsse (etwa durch ungewollte Spaltwasserverluste oder gewollte Zugabewasserverluste an den Schleusentoren sowie einmündete Fließgewässer innerhalb der Kanalhaltung) würden in der Haltung einen gleichförmigen, stationären Normalabfluss bedingen. An den Schleusen würde sich eine Staukurve oder Senkungslinie einstellen (ungleichförmig, stationär).

Mit dem Öffnen der Stauschleuse ergießt sich ein Füllschwall ins Unterwasser, während sich ein Entnahmesunk als Abnahme des Wasserstandes im Oberwasser ausbreitet.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle entspricht der Summe aus Fließgeschwindigkeit und Wellengeschwindigkeit: Andererseits setzt sich beim Schließen der Schleusentore ein Absperrschwall ins Oberwasser und ein Absperrunk ins Unterwasser fort. Beide Zustände sind instationäre Abflussvorgänge, da die Fließgeschwindigkeit bezogen auf einen bestimmten Ort über die Zeit variabel ist. Die Ausbreitung der Wellen wird Translation genannt. Die Höhe der Sunk- und Schwallwelle nimmt mit der Entfernung vom Entstehungs-

ort ab. Die Welle zieht sich in die Länge und flacht ab.

Insbesondere um die Wellenhöhe des Füllschwalls richtig erfassen zu können, ist eine instationäre Berechnung mit einem hydrodynamischen Modell unerlässlich (Berücksichtigung der Abflusshysterese). Dabei wird das sog. St.-Venant'sche-Gleichungssystem¹¹³ zugrunde gelegt. Dieses ist ein System von partiellen Differenzialgleichungen 1. Ordnung für die beiden unbekannt Funktionen der Wassertiefe (bzw. Fließtiefe) und der Fließgeschwindigkeit, welche von den Parametern des Ortes und der Zeit abhängen. Zur Lösung müssen Anfangsbedingungen in Form von Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit zum Beginn der Berechnung definiert werden. Als Randbedingungen müssen an den Modellgrenzen für jeden Zeitpunkt die Wassertiefe und die Fließgeschwindigkeit bekannt sein.

Die Lösung der St.-Venant'schen-Gleichungen ist manuell nur mit äußerst großem Aufwand möglich, so dass man sich in der Regel rechnergestützter, numerischer Modelle bedient. Das im Weiteren verwendete *Storm Water Management Modell* der US-Regierungsbehörde *Environmental Protection Agency* (kurz: EPA SWMM oder *SWMM*) bietet neben der Möglichkeit einer dynamisch-instationären Simulation eines Schleusungsvorganges auch die spätere Erweiterung um ein Niederschlags-Abfluss-Modell.

Das verwendete Modell ist eindimensional. Mit diesem wird die über den Fließquerschnitt integrierte Wasserbewegung ausschließlich in der Hauptfließrichtung berechnet. Hierbei werden mehrdimensionale Effekte (Sekundärströmungen bzw. Querströmungen) vernachlässigt. Ein eindimensionales, hydrodynamisches Modell berücksichtigt insbesondere den Gewässerquerschnitt, das Gefälle und die Gewässerrauheit, um die zeitliche Veränderung der aus den vorgegebenen Abflüssen resultierenden Wassertiefen zu errechnen.

Für die weiteren Untersuchungen werden zwei unterschiedliche Szenarien im Modell

¹¹³ vgl. hierzu: Heinemann und Feldhaus 2003, 265 ff.; Rössert 1999, 100 ff.

abgebildet. Szenario 1 stellt den Betriebszustand um 1890 dar, wie er von Rehder recht detailliert beschrieben wurde. Im Szenario 2 wird ein möglicher Betriebszustand um 1400 mit zwei Stauschleusen an der Hahnenburger Schleusentreppe rekonstruiert.

7. Definition einzelner Modellteile

Die untersuchten Szenarien basieren auf Komponenten, die beiderseits genutzt und folgend erläutert werden.

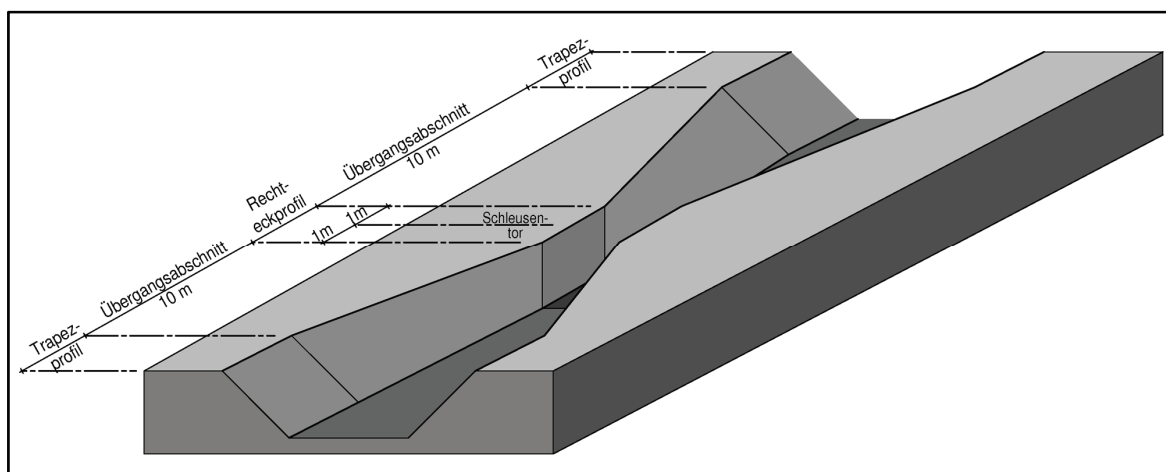
7.1 Querprofile und Rauheiten

Die Querschnittsprofile wurden in Anlehnung an Abs. 3.4 gewählt und sind in Abb. 7 dargestellt. Das Querschnittsprofil 1 wurde in der Simulation des Betriebszeitpunktes um 1400 verwendet (Szenario 2). Die anderen beiden Querprofile kamen ausschließlich bei der Modellierung des Zustandes um 1890 zur Anwendung (Szenario 1). Das Querschnittsprofil 2 wurde in den Haltungen südlich und nördlich der Scheitelhaltung angewendet. Das Doppel-Trapezprofil 3 war ausschließlich im Scheitelkanal vorhanden.

Die Rauheiten der Gewässersohle und der Böschungen wurden einheitlich zu $k_{St} = 36 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ festgesetzt. Dieses entspricht einem natürlichen Flussbett mit verkrauteten Ufern.¹¹⁴

Die Schleusenammern wurden im Szenario 1 als offene Rechteckprofile entsprechend der von Rehder angegebenen Kammergröße (Tab. 4) angesetzt. Die Wand- und Sohlrauheiten orientieren sich mit $k_{St} = 67 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ an üblichen Werten für Mauerwerk.¹¹⁵ Vor und hinter den Kammer- und Stauschleusen wurde ein 1 m langes Rechteckprofil angeordnet, welches der Torbreite entspricht. Zwischen dem trapezförmigen Regelprofil und dem rechteckförmigen Torquerschnitt wurde ein Übergangsprofil mit einer Länge von 10 m modelliert (Abb. 9). Für die Simulation des Zustandes um 1400 (Szenario 2) wird ein 3,50 m breiter, rechteckiger Schleusenquerschnitt mit einer Länge von 2 m gewählt, in dem sich das Schleusentor mittig befand. Der Übergang vom Trapez- zum Rechteckprofil erfolgte hier sinngemäß.

Abb. 9: Isometrische Darstellung des Überganges vom Trapezprofil zum Rechteckprofil am Beispiel der Stauschleusen.



¹¹⁴ Schneider 2002, 13.21.

¹¹⁵ ebd.

7.2 Schleusenöffnung

Die Schleusentore waren durch Schützbretter verschlossen, die nacheinander einzeln gezogen werden mussten, bevor der Schleusenquerschnitt durch das Umlegen des Schleusenbaumes für die Schiffspassage freigegeben werden konnte (vgl. Abs. 3.2.3). Der zeitliche Verlauf dieses Vorganges hatte insbesondere bei den Stauschleusen einen dominanten Einfluss auf die Höhe und die Form der für die Schifffahrt erforderlichen Schwallwelle.

Daher war für die numerische Modellierung zunächst festzulegen, mit welcher zeitlichen Folge der Schleusenquerschnitt freigegeben wird. Anhand von Angaben über die Schwallwellenhöhe, wie sie von Rehder gemacht wurden, kann das Modell kalibriert werden (vgl. Abs. 3.3).

Ereignis	t[<i>min</i>]	A_{rel} [-]
geschlossene Schleusentore	< 0	0,00
Ziehen des 1. Schützbrettes	0	0,00
	1	0,20
Ziehen des 2. Schützbrettes	2	0,20
	3	0,35
Ziehen des 3. Schützbrettes	4	0,35
	5	0,50
Ziehen des 4. Schützbrettes	6	0,50
	7	0,65
Ziehen des 5. Schützbrettes	8	0,65
	9	0,80
Öffnen der Torrahmen/ -flügel	10	0,80
	11	1,00
Gesamter Querschnitt geöffnet	> 11	1,00

Tab. 5: Zeitlicher Verlauf des relativen Schleusenöffnungsquerschnittes (Zeitreihe der Schleusenöffnung).

Der auf diese Weise „geeichte“ Schleusenöffnungsvorgang gilt dann als Grundlage für die weitere Modellierung.

Das Ziehen der Schützbretter kann mathematisch durch den relativen Schleusenöffnungsquerschnitt (A_{rel} in Tab. 5) definiert werden. Dieses sei der Quotient aus dem bereits freigegebenen Fließquerschnitt sowie dem gesamten Schleusenquerschnitt.

Es wurde exemplarisch die Öffnung einer Stauschleuse simuliert und der zeitliche Vorgang der Schleusenöffnung so lange variiert, bis eine hinreichende Übereinstimmung mit den historischen Angaben bestand. Anhand der ermittelten Schwallwellenhöhen für verschiedene simulierte, zeitliche Verläufe des relativen Schleusenöffnungsquerschnittes und aus praktischen Überlegungen (der Schleusenmeister wird eine gewisse Zeit benötigt haben, um die Schützbretter zu ziehen) ist der Öffnungsvorgang nach Tab. 5 festgelegt worden. Dieser Ablauf entspricht der Öffnung eines Schleusentores mit fünf Schützbrettern, wie er in Abs. 3.2.1 beschrieben wird und als üblich an der Stecknitzfahrt angesehen werden kann.

Für die Kalibrierung der Schwallwellenhöhe wurde ein trapezförmiges Erdkanalprofil mit einer Sohlbreite von 12 m und Böschungsneigungen von 1 : 2 zugrunde gelegt (Sohlgefälle 2 ‰).

Die Schleusentore wurden im Modell als Wehre modelliert, deren Wehrkronenhöhe über Zeiterien gem. Tab. 5 definiert werden kann. Auf diese Weise kann das Ziehen der einzelnen Schützbretter nachgebildet werden. Mit dem Ziehen der einzelnen Schützbretter wurden jeweils einzelne Teilschwallwellen geringer Höhe im Unterwasser induziert. Diese überlagerten sich insgesamt und bewirkten eine Gesamterhöhung der Wassertiefe. In Abb. 10 ist der zeitliche Verlauf der Wasserstandshöhen unterhalb der Stauschleuse an verschiedenen Stationen des Kanalabschnittes abgebildet. Deutlich erkennbar an der Ganglinie 10 m unterhalb der Stauschleuse sind die

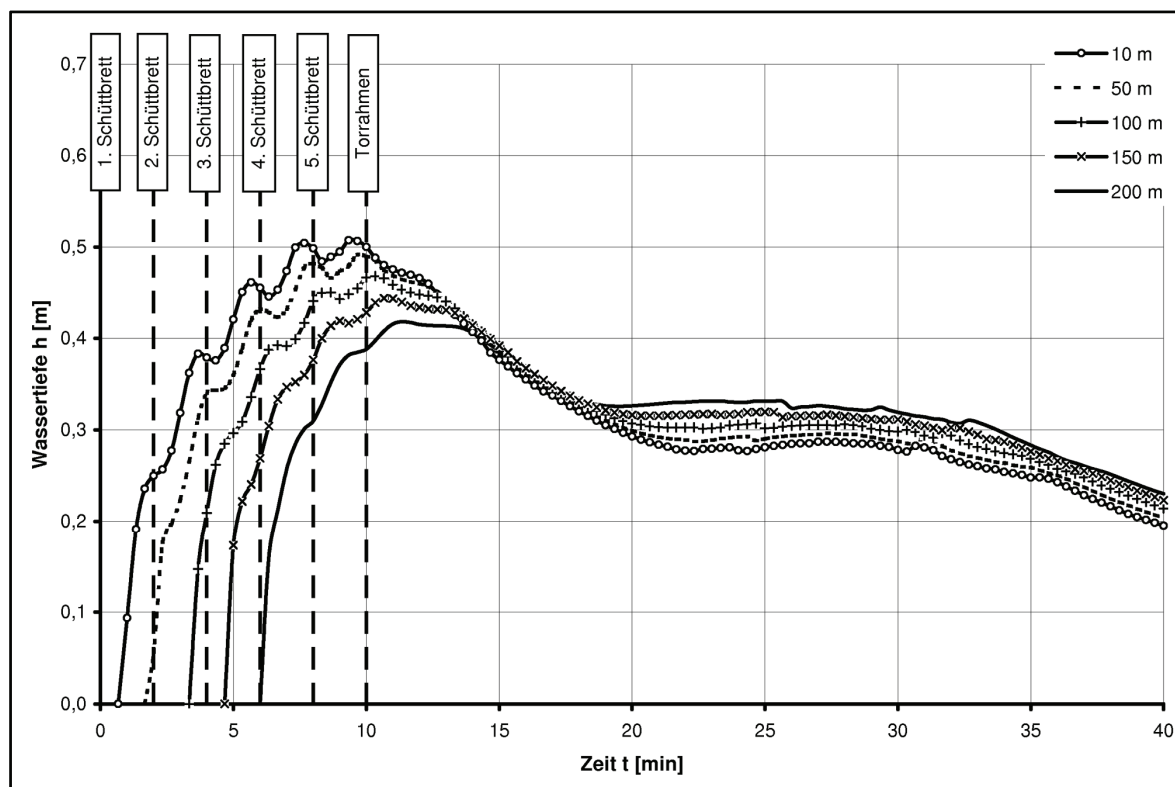


Abb. 10: Zeitlicher Verlauf der Wassertiefen an verschiedenen Stationen unterhalb einer Stauschleuse im Kalibrierungsmodell.

einzelnen Wellenberge, die aus dem Ziehen der einzelnen Schütbretter resultierten. Direkt unterhalb der Schleuse ergab sich somit eine Wasserstandserhöhung von etwa 52 cm (simulierte Wasserstands-differenz vor der Schleusenöffnung: rund 1,50 m).

Rehder gab für die Berkenthiner Schleuse mit ähnlichen geometrischen Randbedingungen und einer Wasserspiegeldifferenz von 1,88 m eine Schwallwellenhöhe von bis zu 80 cm in vegetationsarmen Perioden an.¹¹⁶ Zwischen beobachteten und berechneten Werten besteht somit eine ausreichende Übereinstimmung.¹¹⁷

¹¹⁶ Rehder 1890, 633.

¹¹⁷ Das Erreichen einer exakten Übereinstimmung ist hier nicht möglich, da die Randbedingungen (v. a. das Sohlgefälle unterhalb der Berkenthiner Schleuse) für die von Rehder angegebene Schwallwellenhöhe nicht hinreichend bekannt sind.

Weiterhin verdeutlicht Abb. 10, dass sich die Schwallwellenhöhe mit zunehmendem Abstand zur Stauschleuse abflachte. Dieser Effekt beruht auf Reibungsverluste an der Gerinnwandung und -sohle sowie darauf, dass sich die Welle infolge des Sohlgefälles beschleunigt und lang zieht. Außerdem kann beobachtet werden, dass sich die einzelnen Schwallwellen mit einer bestimmten Geschwindigkeit in das Unterwasser fortbewegen (Translation). Während 10 m unterhalb der Stauschleuse die erste Teilschwallwelle bereits nach ca. 1 min auftrat, erreichte sie einen Punkt 150 m unterhalb des Wehres erst nach rund 6 min (Ausbreitungsgeschwindigkeit etwa 0,63 m/s).

Die Fließgeschwindigkeiten am betrachteten Knotenpunkt 10 m unterhalb der Schleuse betragen im Maximum rund 0,73 m/s. Der maximale Abfluss lag bei etwa 4,4 m³/s.

7.3 Spaltwasser und Zugabewasser

Da die Schleusentore den Fließquerschnitt niemals vollständig abgeschlossen haben können, wurde auch bei geschlossenen Toren stets ein bestimmter Anteil des zufließenden Wassers in Form sog. Spaltwasserverluste an die unterwasserseitige Haltung abgegeben.

Die Größe der Spaltwasserverluste war abhängig von der „Güte“ der Tore, d. h. wie gut diese unter konstruktiven Gesichtspunkten tatsächlich den Querschnitt abschlossen. Sie hingen wesentlich von der Wasserspiegeldifferenz ab: Je größer dieses Gefälle war, desto größer war der Spaltwasserverlust. Diese Funktion der wasserstandsabhängigen Spaltwasserabgabe war für jedes einzelne Schleusentor charakteristisch.

Den ungewollten Spaltwasserverlusten standen beabsichtigte Zugabewasserabgaben gegenüber. Diese konnten beispielsweise aus einem partiell gezogenen Schüttbrett resultieren und dienten einer künstlichen Abflusssteigerung. Beide Abflüsse waren von der Wasserstands-differenz und somit von der Zeit abhängig und werden unter dem Begriff Wasserabgaben zusammengefasst. Ihre Größe soll durch eine Funktionsschar $Q(t,h)$ beschrieben werden.

Das System der Schleusentreppe hinsichtlich des Spalt- und Zugabewasseraustausches ist in Abb. 11 skizziert.

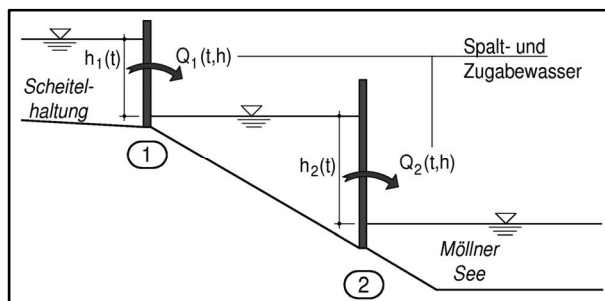


Abb. 11: Skizze der Hahnenburger Schleusentreppe mit Eintragung der Wasserabgaben.

Da das Speichervolumen in der Scheitelhaltung gegenüber den kleinen Verlusten und den natürlichen Zuflüssen sehr groß war, wird die Wassertiefe h in der Scheitelhaltung für den Zeitraum zwischen den Schleusungen als konstant angenommen. Die Wassertiefe h_2 und somit die Abflussgröße Q_2 änderten sich über die Zeit.

Von besonderem Interesse an den weiteren Überlegungen ist die Wassertiefe h_2 zwischen beiden Schleusenanlagen, da diese Haltung als besonders kritisch in Hinblick auf die Einhaltung einer ausreichenden, schiffbaren Wassertiefe einzuordnen ist. Im Weiteren wird aufgezeigt, dass diese Beziehung ein zentraler Aspekt im Verständnis des wasserwirtschaftlichen Betriebes der Hahnenburger Schleusentreppe gewesen ist.

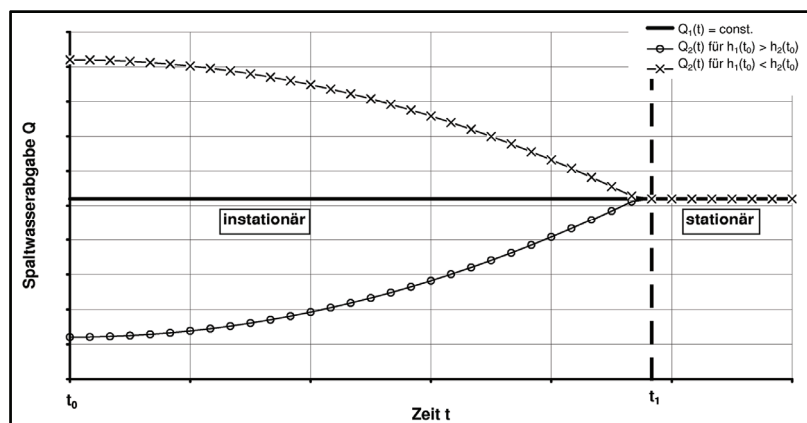


Abb. 12: Schematische Ganglinie der wasserstands- und zeitabhängigen Wasserabgaben (Spalt- und Zugabewasser).

Da die Wasserabgabe aus der Scheitelhaltung Q_1 in dem Zeitintervall $[t_0; t_1]$ (einem beliebigen Zeitraum zwischen zwei Schleusungen) nahezu konstant war, galt in Abhängigkeit der Anfangswasserstände h_i zur Zeit t_0 , der in Abb. 12 dargestellte zeitliche Verlauf der Spaltwasserabgaben.

Ab dem Zeitpunkt t_1 waren die Abflussgrößen Q_1 und Q_2 gleich groß; es stellte sich ein stationärer Abflusszustand ein.

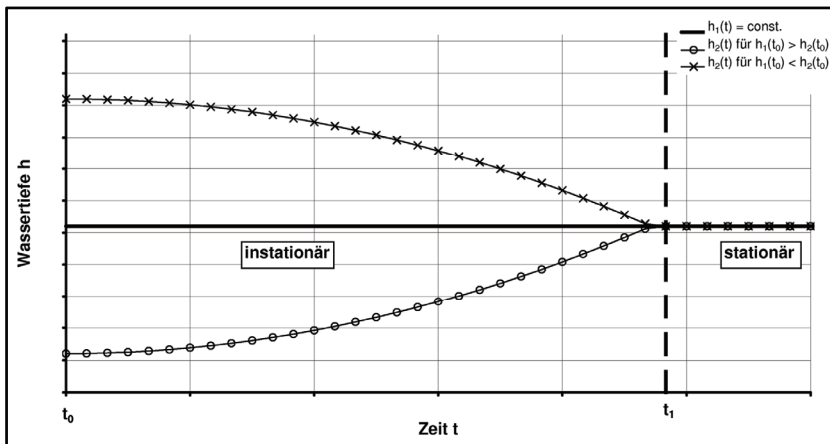


Abb. 13: Schematische Darstellung der wasserstands- und zeitabhängigen Wassertiefen für den Sonderfall gleich großer spezifischer Wasserabgaben am oberen und unteren Tor (Fall 1).

Wie groß der Zeitraum zwischen t_0 und t_1 war, hing einerseits von der jeweiligen Funktion $Q(h)$ ab (wie groß waren die „Spalten“ in den Toren bzw. wie weit waren die Schützbretter gezogen) und andererseits von den Wasserstandsunterschieden h_1 und h_2 zum Zeitpunkt t_0 . Der zeitliche Verlauf der Wassertiefen h_2 hing im Wesentlichen von den Anfangswasserständen ab (s. Fallunterscheidung für Q_2 in Abb. 12).

In Abhängigkeit der Funktionen für die wasserstandsabhängige Wasserabgabe Q_h sind folgende Fallunterscheidungen notwendig:

Fall 1:

$$Q_1'(h) = Q_2'(h) [t_0 ; t_1]$$

Die wasserstandsabhängige Wasserabgabe ist für beide Tore gleich groß (Sonderfall). Abhängig von den Anfangswasserständen h_1 zur Zeit t_0 ergeben sich dann die schematisch in Abb. 13 dargestellten zeitabhängigen Wassertiefen. Ab dem Zeitpunkt t_1 sind die Wassertiefen h_1 und h_2 gleich groß. Es stellt sich ein stationärer Abflussvorgang ein.

Wie groß der Zeitraum zwischen t_0 und t_1 ist, hängt von der Differenz zwischen h_1 und h_2 zum Zeitpunkt t_0 , von der Funktion $Q(h)$ und vom Speichervolumen des betrachteten Kanalabschnittes ab.

Fall 2:

$$Q_1'(h) > Q_2'(h) [t_0 ; t_1]$$

Die wasserstandsabhängige Wasserabgabe ist für das obere Tor größer als für das untere. Abhängig von den Anfangswasserständen h_1 zur Zeit t_0 ergeben sich die in Abb. 14 dargestellten Wassertiefen. Ab dem Zeitpunkt t_1 ist demnach die Wassertiefe h_2 größer als h_1 . Durch diese Betriebsweise (z.B. ein gezogenes Schützbrett am oberen Wehr) wäre eine gezielte Wasserstandserhöhung zwischen beiden Schleusen möglich.

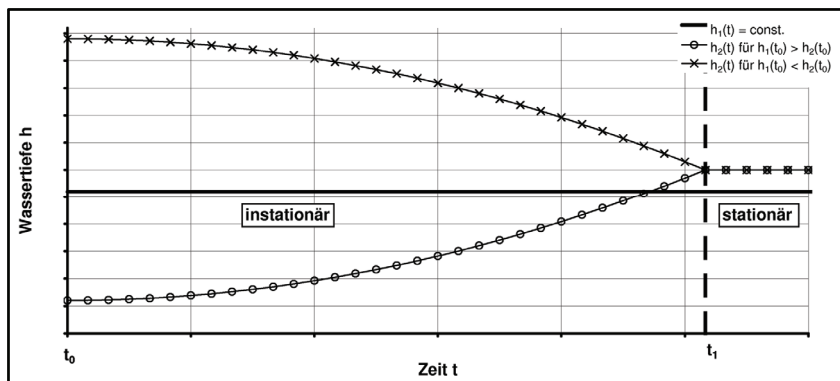


Abb. 14: Schematische Darstellung der wasserstands- und zeitabhängigen Wassertiefen für Fall 2.

Fall 3:

$$Q_1'(h) < Q_2'(h) [t_0; t_1]$$

Die wasserstandsabhängige Wasserabgabe ist für das untere Tor größer als für das obere. Nach Abb. 15 ist die Wassertiefe h_2 ab dem Zeitpunkt t_1 kleiner, als in den betrachteten Fällen 1 und 2. Dieses kann nachteilige Auswirkungen auf die Schiffbarkeit der betrachteten Kanalhaltung haben. Die Haltung zwischen beiden Schleusen kann trocken fallen.

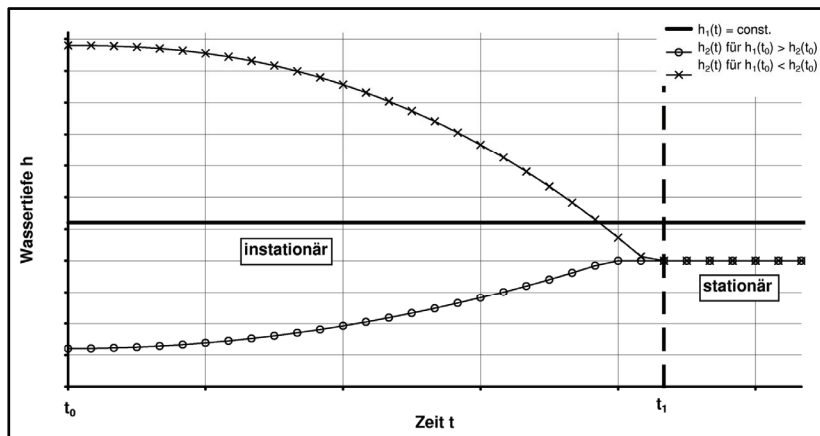


Abb. 15: Schematische Darstellung der wasserstands- und zeitabhängigen Wassertiefen für Fall 3.

Diese Überlegungen gelten sowohl für Stauschleusen als auch für Kammerschleusen, da auch bei diesen stets nur ein Tor geschlossen war. Allerdings ist im Detail zu prüfen, inwieweit die Annahme einer konstanten Wassertiefe h in der Scheitelhaltung für das Zeitintervall $[t_0; t_1]$ zwischen den Schleusen bei einem Szenario mit Stauschleusen zutreffend ist.

Wahrscheinlich fand seitens der Schleusenmeister an der historischen Stecknitzfahrt eine bewusste Beeinflussung der Wasserabgaben statt. So ist es doch relativ einfach, ein Schüttbrett teilweise geöffnet zu lassen und somit den Abfluss zu vergrößern. Auf diese Weise konnte der Wasserstand zwischen dicht beieinander liegenden Schleusen reguliert werden. Im Weiteren ist zu prüfen, inwieweit eine gezielte Nutzung des Wassers aus der Scheitelhaltung zu diesem Zweck aus was-

serwirtschaftlicher Sicht möglich war. Stand für eine solche Betriebsweise überhaupt genügend Wasser zur Verfügung?

7.4 Der Möllner See

Unterhalb der Hahnenburger Schleusentreppe befand sich der Möllner See. Dieser bewirkt als Retentionsraum eine Abflachung der (Schwall-) Wellen, die aus den Schleusungsvorgängen resultieren. Um die Retentionswirkung berechnen zu können, benötigt *SWMM* eine Wasserstands-Oberflächenbeziehung.

Aus topografischen Karten kann die Oberfläche S bei einem Wasserstand von 12 mNN¹¹⁸ zu etwa 53 ha bestimmt werden. Bei einer geschätzten Uferlänge l_u von rund 3.800 m und Böschungsneigungen

von 1 : 2 kann die Oberfläche des See zu $S = l_u \cdot h^2 + A_G$ in Abhängigkeit des Wasserstandes h berechnet werden.¹¹⁹

7.5 Zuflüsse

Das betrachtete System hat im Bereich der Scheitelhaltung sehr geringe Zuflüsse. Rehder nennt hier lediglich den Priesterbach. Bei einer Einzugsgebietsgröße von 31,4 km² und einer mittleren Abflussspenden von 5,26 l/(s*km²) ergibt sich ein Zufluss von rund 165 l/s. Dieser wird im Modell an der Station 46+400 angesetzt. Die gewählte Abflussspende repräsentiert einen Zustand der Monate Mai/ Juni oder September/ Oktober (vgl. Abs. 4).

¹¹⁸ Rehder 1890, 583; Rehder 1892, 5 und Anlage 59.

¹¹⁹ Die Grundfläche des Sees (auf Sohlniveau) wurde mit $A_G = 450.000 \text{ m}^2 = 45 \text{ ha}$ angenommen. Der Wasserstand h bezieht sich auf ein angenommenes Sohlniveau von 7,5 mNN.

7.6 Zeitliche und räumliche Diskretisierung

Bei der Lösung des St.-Venant'schen Gleichungssystems (vgl. Abs. 6.2) ist für die Gewährleistung der numerischen Stabilität ein äußerst geringer Zeitschritt zwischen zwei Berechnungsintervallen notwendig, insbesondere wenn in kurzen Zeitabschnitten mit einer großen Abflussänderung in einzelnen Kanalabschnitten gerechnet werden muss (z. B. beim Öffnen der Stauschleusen). Daher wurde für die durchgeführte Simulation ein Zeitschritt von 0,1 Sekunden gewählt.

Die von *SWMM* anhand der Manning/Strickler-Gleichung aus dem Abfluss bestimmte Wassertiefe kann nur an definierten Knoten aus den Simulationsergebnissen abgeleitet werden (gleiches gilt für die Fließgeschwindigkeit und andere hydraulische Parameter). Um also eine möglichst gute räumliche Auflösung der Schwallwellen zu erreichen und abermals zur Sicherung der numerischen Stabilität ist nahe den Schleusenanlagen ein Knotenabstand von 0,5 m gewählt worden. In Bereichen, in denen ein überwiegend gleichförmiger Strömungsvorgang zu erwarten war, wurde ein Knotenabstand von bis zu 50 m angewendet.

Durch die zum Teil sehr geringe räumliche und zeitliche Diskretisierung entsteht ein immenser Rechenaufwand, da an jedem Knoten für jeden Zeitschritt das St.-Venant'sche Gleichungssystem iterativ zu lösen ist.

8. Untersuchung unterschiedlicher Szenarien

8.1 Szenario 1: Hahnenburger Schleusentreppe um 1890

Zunächst wurde der durch Rehder 1890 verhältnismäßig genau beschriebene Betriebszustand der Hahnenburger Schleusentreppe und der Scheitelhaltung untersucht, bei dem neben den beiden Kammerschleusen eine Stauschleuse am Übergang zum Möllner See existierte. Am südlichen Abschluss der Scheitelhaltung befand sich die 1830 errichtete Horn-

beker Kammerschleuse, die neben der Zienburger Stauschleuse im weiteren Verlauf der Delvenau in die Modellierung einbezogen wurde, da sie bei einer Langzeitsimulation einen entsprechenden Einfluss auf den Wasserstand in der Scheitelhaltung haben.¹²⁰

Für die zur Schifffahrt erforderliche Wassertiefe wurden die in Tab. 1 (Abs. 3.4) angegebenen 87 cm zugrunde gelegt.

In Abb. 16 sind für dieses Szenario maßgebenden geometrischen Modellierungsparameter (Kanal- und Schleusenquerschnitte) zusammengestellt. Anhand der von Rehder detaillierten Angaben kann der tatsächliche Betrieb im Modell unter Berücksichtigung der hydraulischen Verhältnisse gut nachgebildet werden.

Zudem sind in Abb. 16 die für die Simulation erforderlichen Anfangswasserstände und an den Modellgrenzen Überfälle als Randbedingungen definiert.

Ausgehend von den hydrologischen Betrachtungen (vgl. Abs. 4) bietet sich für den Kanalbetrieb mit Kammerschleusen zunächst eine überschlägige Wasserbilanzrechnung an. In diesem Fall kann das Wasservolumen, das beim Schleusen an das Unterwasser abgegeben wurde, über die Kammergeometrie genau bestimmt werden. Aus den Simulationsergebnissen können anschließend die hydraulischen Kenngrößen (z. B. Wassertiefe oder Fließgeschwindigkeit) für jeden Ort und zu jedem Zeitpunkt abgeleitet werden. Diese erlauben eine Beurteilung der Schifffbarkeit und der Betriebsbedingungen in den untersuchten Kanalhaltungen.

¹²⁰ Die Langzeitsimulation umfasst mehrere Tage. Unterwasserseitig gelegene Schleusen haben dann einen Einfluss auf die Scheitelhaltung, wenn die Wasserbilanz innerhalb eines Simulationszyklus ausgeglichen sein soll.

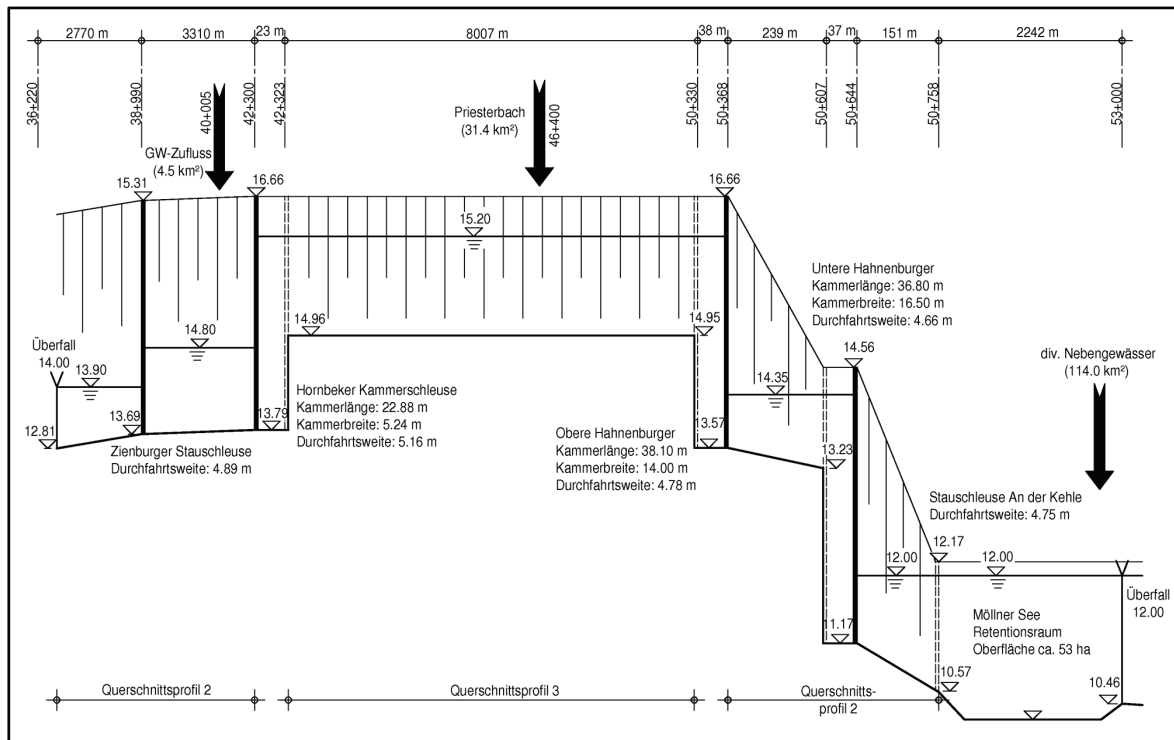


Abb. 16: Darstellung der maßgeblichen, geometrischen Modellierungsparameter für das Szenario 1 für den Betriebszustand um 1890 nach den Angaben Rehders. Angegeben sind neben der Kammergeometrie die Zuflüsse, die Sohl- und Böschungshöhen sowie die für das numerische Modell erforderlichen Anfangswasserstände und an den Modellgrenzen Überfälle als Randbedingungen (ohne Maßstab).

8.1.1 Wasserbilanz

Aufgrund der kleinen Einzugsgebietsgröße und des daraus resultierenden geringen Zuflusses in der Scheitelhaltung war das Wasserdargebot ein limitierender Faktor für die Aufrechterhaltung der Schifffahrt. Durch jeden Schleusungsvorgang an einer der beiden Abschlusschleusen wurde bei def. Hubhöhe ein durch die Kammergeometrie (Tab. 4) bestimmtes Wasservolumen in die jeweils unterwasserseitige Kanalhaltung abgegeben. Entsprechend der Zapfeltage (vgl. Tab. 3, rechte Spalte) war jeweils eine Schleusung pro Tag vorgesehen (täglich je eine Berg- und eine Talschleusung, d. h. eine Kammerfüllung pro Tag).

Unter Beachtung der in Abs. 4 ermittelten Zuflüsse kann das überschüssige Wasservolumen bestimmt werden, das in Form ungewollter Spaltwasser- oder bewusster Zugabe-

wasserabgaben an das Unterwasser gegeben werden konnte. Aus dieser Bilanzierung geht hervor, dass trotz regelmäßiger Schleusungen etwa 90 % des Mittelwasserzuflusses abgegeben werden konnte.

Aus hydrologischer Sicht ist also eine Schifffahrt auf der zu beiden Seiten mit Kammerchleusen abgeschlossenen Scheitelhaltung dauerhaft möglich gewesen. Allein die Verteilung des „überschüssigen“ Wassers auf die beiden Abschlusschleusen der Scheitelhaltung wird im Weiteren genauer untersucht werden müssen.

8.1.2 Schleusungszyklen

Es wurde ein Zyklus simuliert, wie er einen gewöhnlichen „Zapfeltag“ entsprochen haben könnte. In Tab. 6 sind die maßgebenden Simulationszeitpunkte zusammengefasst.

Tab. 6:
Schleusungs-
zyklen für
Szenario 1.

Operation		Simulationszeit [h:min]
Abwärtsschleusung an der Oberen Hahnenburger	Schließen Oberhaupt	7:00 - 7:06
	Öffnen Unterhaupt	7:10 - 7:22
Abwärtsschleusung an der Unteren Hahnenburger	Schließen Oberhaupt	8:00 - 8:06
	Öffnen Unterhaupt	8:10 - 8:22
Aufwärtsschleusung an der Unteren Hahnenburger	Schließen Unterhaupt	10:00 - 10:06
	Öffnen Oberhaupt	10:10 - 10:22
Aufwärtsschleusung an der Oberen Hahnenburger	Schließen Unterhaupt	11:00 - 11:06
	Öffnen Oberhaupt	11:10 - 11:22
Abwärtschleusung an der Hornbeker	Schließen Oberhaupt	13:00 - 13:06
	Öffnen Unterhaupt	13:10 - 13:22
Aufwärtschleusung an der Hornbeker	Schließen Unterhaupt	15:00 - 15:06
	Öffnen Oberhaupt	15:10 - 15:22
Öffnen der Zienburger Stauschleuse	Öffnen Tore	17:00 - 17:12
	Schließen Tore	17:30 - 17:36

Zunächst wurden die in der Scheitelhaltung befindlichen Schiffe abwärts in den Möllner See geschleust, anschließend folgte die Bergschleusung der Richtung Lauenburg fahrenden Schiffe. Danach erfolgten die Schleusungen an der Hornbeker und der Zienburger Schleuse. Die in der folgenden Auswertung dargestellten Zeitreihen orientieren sich am Simulationszeitpunkt in dieser Abfolge. Innerhalb des in Tab. 6 dargestellten Zyklus ist der nach Tab. 5 definierte Schleusenöffnungsvorgang eingebettet.

Durch das Aneinanderreihen mehrerer Zyklen (Simulation einer Folge mehrerer Tage) wurden die Auswirkungen möglicher Fehler bei der Definition der Anfangs- und Randbedingungen minimiert. Diese Fehler können beispielsweise durch unpassende Anfangswasserstände in den einzelnen Kanalabschnitten auftreten. Unter Aufrechterhaltung einer ausgeglichenen Wasserbilanz stellt sich nach mehreren Zyklen jedoch ein Gleichgewichtszustand ein (die Summe des zufließenden Wasservolumens ist gleich der des abfließenden Wasservolumens bezogen auf einen Kanalabschnitt), was dazu führt, dass der Wasserstand an einem bestimmten Standort zu Beginn und am Ende eines Schleusungszyklus annähernd gleich ist.

8.1.3 Simulationsergebnisse

a) Wassertiefen

In Abb. 17 ist neben den berechneten Wassertiefen für verschiedene Stationen an der Hahnenburger Schleusentreppe während eines Schleusungszyklus¹²¹ die zur Schifffahrt notwendige Mindestwassertiefe dargestellt. Des Weiteren sind die Schleusungszeitpunkte gem. Tab. 6 markiert.

Es wird deutlich, dass in der Kanalhaltung zwischen den beiden Kammerschleusen (Linie b in Abb. 17) nach der Aufwärtsschleusung an der unteren Kammerschleuse zunächst eine nicht ausreichende Wassertiefe vorhanden war.

Anhand einer größeren Wasserabgabe an den geschlossenen Toren der oberen Kammerschleuse (gezogenes Schüttbrett) im Vergleich zur unteren stieg der Wasserstand allerdings innerhalb von rund 7,5 Stunden auf einen Wert von etwa 97 cm und blieb dann konstant (vgl. hierzu Abs. 7.3 und Abschnitt b dieses Kapitels).

¹²¹ Die in den folgenden Diagrammen auf der Ordinate aufgetragenen Simulationszeiten beziehen sich stets auf Tab. 6.

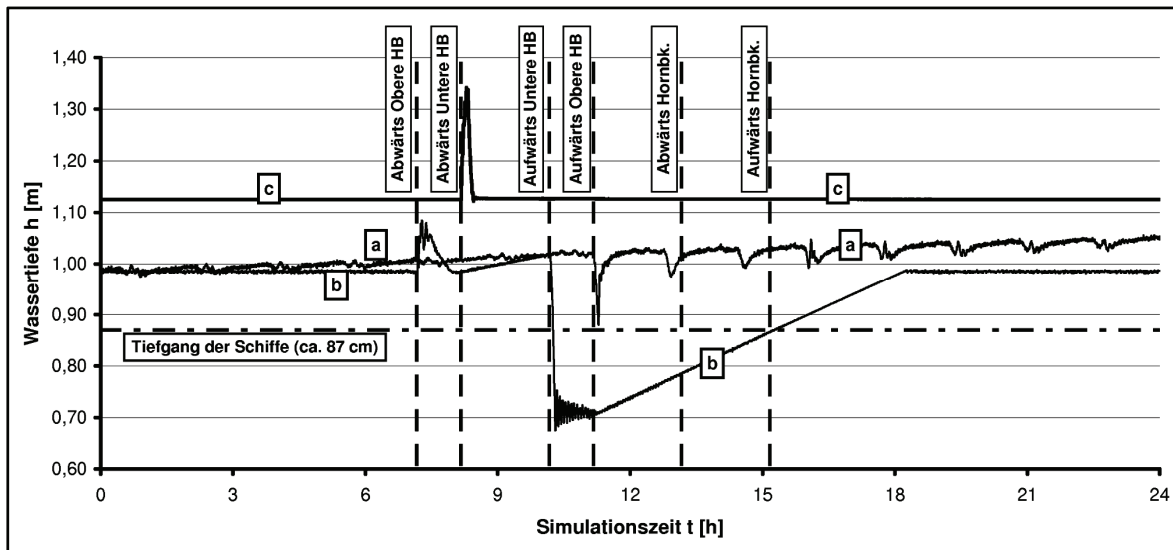


Abb. 17: Szenario 1 – Verlauf der Wassertiefen für verschiedene Kanalabschnitte im Bereich der Hahnenburger Schleusentreppe über einen Simulationstag: (a) 50 m oberhalb der Oberen Hahnenburger Kammerschleuse [Scheitelhaltung]; b) 50 m unterhalb der Oberen Hahnenburger Kammerschleuse; c) 50 m unterhalb der Unteren Hahnenburger Kammerschleuse [Übergang zum Möllner See].

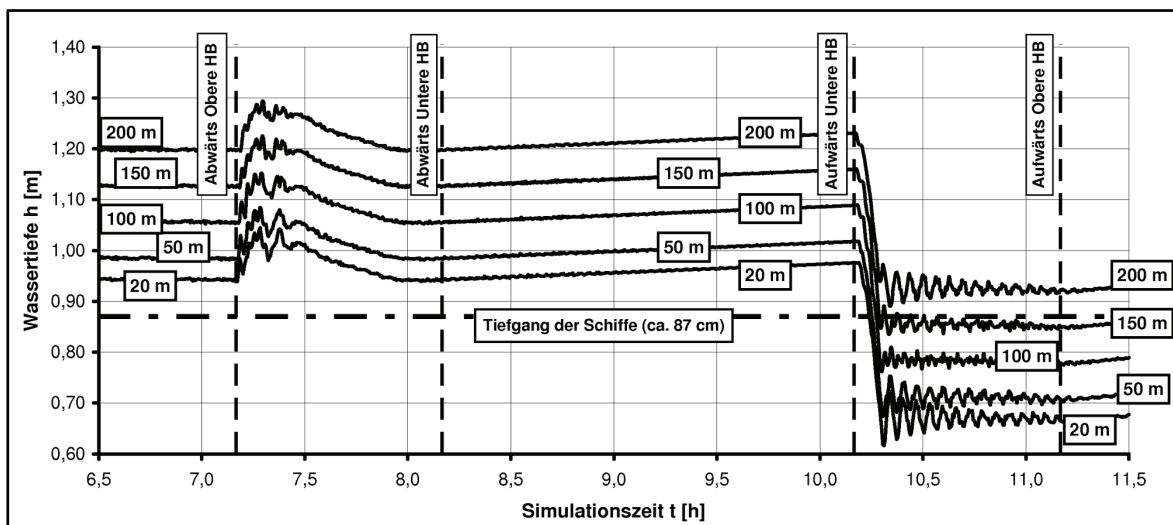


Abb. 18: Szenario 1 – Verlauf der Wassertiefen für verschiedene Stationen unterhalb der Oberen Hahnenburger Kammerschleuse (angegeben sind die Wassertiefen für unterwasserseitige Abstände).

Am Übergang zum Möllner See (Linie c in Abb. 17) war stets eine ausreichende Wassertiefe vorhanden. Erkennbar ist zudem, dass sich ein Sunkwelle in der Scheitelhaltung (Linie a in Abb. 17) ausbreitete, nachdem die Schleusenkammer der oberen Kammerschleu-

se zum Zweck der Bergschleusung gefüllt worden war ($t = 11$ h).

Der Wasserstand zwischen den Schleusen war aufgrund des Sohlgefälles nur in den oberen Kanalabschnitten zeitweise nicht befahrbar.

Bei einem Abstand von über ca. 160 m unterhalb des Oberhauptes war stets eine für die Schifffahrt ausreichende Wassertiefe vorhanden (Abb. 18).

Deutlich erkennbar in Abb. 18 sind Schwallwellenbewegungen, die nach dem Ziehen der einzelnen Schüttbretter entstanden. Der fluktuierende Wasserstand (ab $t > 10,25$ h) resultierte allerdings in dieser kurzen Kanalhaltung aus einer Überlagerung der reflektierten mit den eigentlichen Schwall- und Sunkwellen. Hierbei ist zu beachten, dass beim Öffnen des Oberhauptes der Kammersehleusen eine Sunkwelle in das Kammerinnere verlief, welche am Oberhaupt reflektiert wurde und sich dann direkt mit den Schwallwellen überlagerte.

In der Zeit zwischen den Talschleusungen an der oberen und der unteren Kammersehleuse sank der Wasserspiegel in dieser Haltung (Abb. 18, $t = 7,5$ bis $8,0$ h). Dieses ist darauf zurückzuführen, dass der Wasserstand vor dem unteren Tor größer war und somit infolge des größeren Wasserdrucks eine höhere Wasserabgabe am unteren Tor resultierte (vgl. Abs. 7.3, dort Fall 3).

Aufgrund des gegenüber dem Kammervolumen vergleichsweise großen, in der Scheitelhaltung gespeicherten Wasservolumens war die Wassertiefe über den Simulationszeitraum relativ konstant (vgl. Abb. 19 oder Abb. 21, dort Linie b). Lediglich nach dem Öffnen des Oberhauptes zum Zwecke der Aufwärtsschleusung kam es zu einer Sunkwelle. Diese ist im kurzzeitigen Fallen des Wasserstandes erkennbar (Abb. 17, Linie a, $t = 11$ h). Die Höhe der Sunkwelle betrug am Schleusentor etwa 16 cm und nahm mit wachsendem Abstand zur Schleuse kontinuierlich ab (Abb. 19). In einer Entfernung von 700 m zur Schleuse hatte sie nur noch eine Höhe von gut 7 cm. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit dieser Sunkwelle betrug etwa 3,4 m/s. Bei einer Länge der Scheitelhaltung von 8 km benötigte diese Welle rund 40 min, um bis zum Oberhaupt der Hornbeker Schleuse zu gelangen. Dort wurde sie reflektiert und gelangte 80 min nach der Entstehung abermals bei der oberen Hahnenburger Schleuse an. Die Sunkwelle

hatte hier immer noch eine Höhe von rund 5 cm. Die Welle lief nunmehr abermals in Richtung der Hornbeker Schleuse. Gut erkennbar ist dieser Zyklus in Abb. 17 (dort Linie a) und Abb. 21 (dort Linie b). Natürlich nahm die Höhe der Sunkwelle ab und war nach einer bestimmten Zeit nicht mehr registrierbar.

Unterhalb der Unteren Kammersehleuse war aufgrund einer in der Simulation nahezu konstanten Wasserspiegellage des Möllner Sees stets eine ausreichende Wassertiefe vorhanden (vgl. Abb. 17, Linie c). Mit einer maximalen Stauhöhe von 12,17 mNN dürfte der Einfluss der Stauschleuse „An der Kehle“ auf die Wassertiefe in der oberwasserseitigen Kanalhaltung gering gewesen sein, da der Wasserstand im Möllner See in der Regel bei etwa 12,00 mNN gehalten wurde. Der Möllner See wirkte hier als Retentionsraum und wurde überdies durch zahlreiche Zuflüsse hinreichend gespeist, so dass das Wasser aus der Scheitelhaltung nicht zwingend für die Schifffahrt in den weiter unterwasserseitig gelegenen Haltungen benötigt wurde. Lediglich in langen Trockenperioden, wenn der Wasserspiegel im Möllner See deutlich gefallen war, wird es daher notwendig gewesen sein, die Stauschleuse „An der Kehle“ in Betrieb zu nehmen. In der vorliegenden Untersuchung wurde diese durchgängig mit geöffneten Toren simuliert.

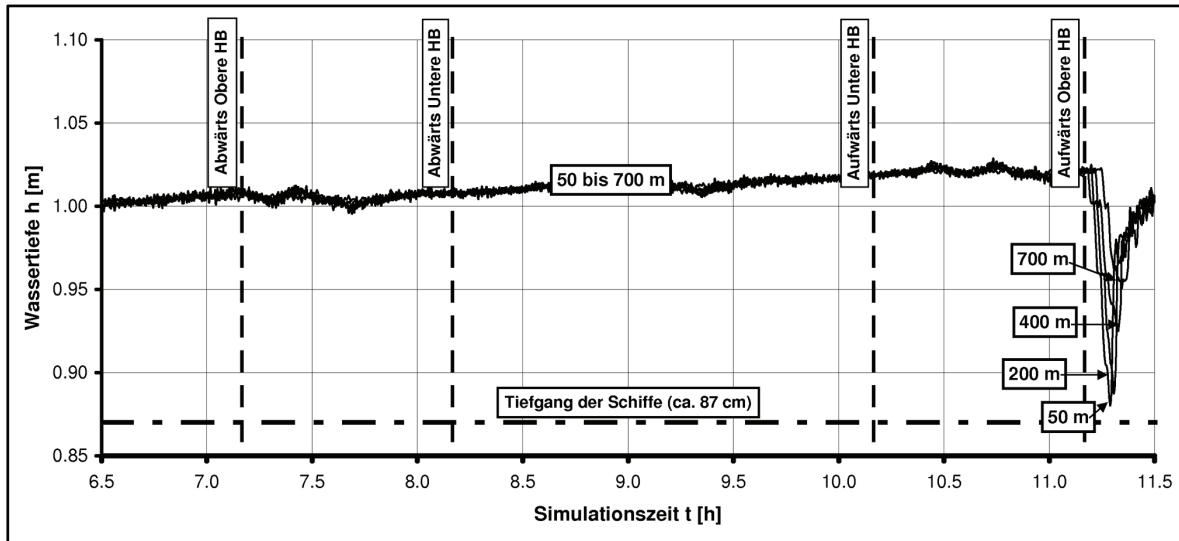


Abb. 19: Szenario 1 – Verlauf der Wassertiefen für verschiedene Stationen oberhalb der Oberen Hahnenburger Kammerschleuse in der Scheitelhaltung (angegeben sind die oberwasserseitigen Abstände zum Oberhaupt der Kammerschleuse).

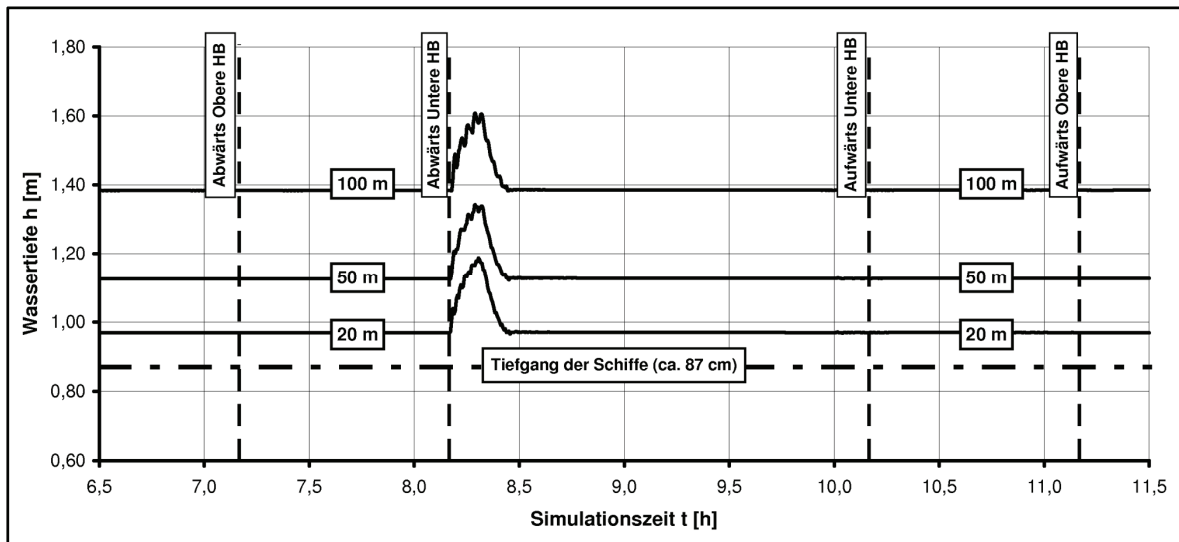


Abb. 20: Szenario 1 – Verlauf der Wassertiefen für verschiedene Stationen unterhalb der Unteren Hahnenburger Kammerschleusen am Übergang zum Möllner See (angegeben sind die unterwasserseitigen Abstände zum Unterhaupt der Kammerschleuse).

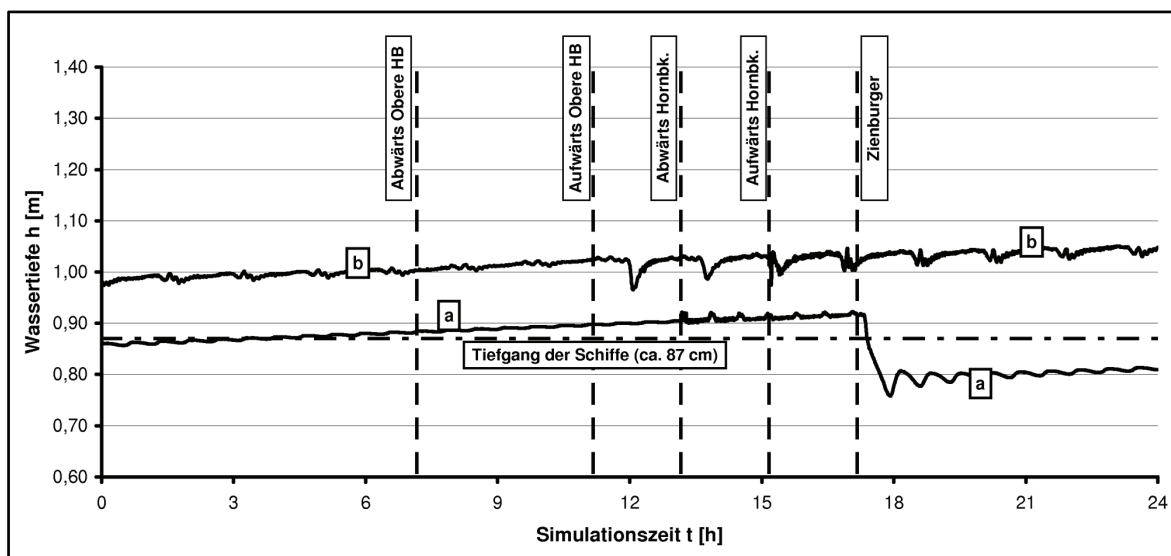


Abb. 21: Szenario 1 – Verlauf der Wassertiefen für verschiedene Kanalhaltungen im Bereich der Hornbeker Kammerschleuse über einen Simulationstag: (a) 50 m unterhalb der Hornbeker Kammerschleuse; (b) 50 m oberhalb der Hornbeker Kammerschleuse [Scheitelhaltung]).

Nach dem Öffnen des Unterhauptes der unteren Hahnenburger Kammerschleuse zum Zwecke der Abwärtsschleusung lief eine Schwallwelle durch die Kanalhaltung (max. Schwallwellenhöhe ca. 18 cm, vgl. Abb. 20, $t = 8,0$ bis $8,5$ h). Vor der geöffneten Stauschleuse „An der Kehle“ nahm die Höhe der Schwallwelle sogar bis auf ca. 22 cm direkt vor der Stauschleuse zu. Dieses war dadurch bedingt, dass der geöffnete Schleusenquerschnitt im Vergleich zum Kanalprofil eine Engstelle darstellte und sich das Wasser aufstaute. Hinter der Stauschleuse betrug die Wellenhöhe nur noch wenige Zentimeter.

Oberhalb der Hornbeker Kammerschleuse ist der zuvor erwähnte 80-minütige Zyklus der durch die Scheitelhaltung laufenden Sunkwelle erkennbar (Abb. 21, Linie b). Die Kanalhaltung unterhalb dieser Schleuse war nach dem Öffnen der Zienburger Stauschleuse zunächst nicht schiffbar (Abb. 21, Linie a, $t > 17$ h). Allein aufgrund des Zugabewassers der Hornbeker Kammerschleuse (erkennbar an der leichten Wassertiefenzunahme, Abb. 21, Linie a; vgl. auch Abs. 7.3, dort Fall 2) konnten die Schiffe über einen Zeitraum von rund 12

Stunden täglich zwischen beiden Standorten verkehren.

Etwas detaillierter sind die Wassertiefen in der Haltung zwischen den Zienburger Stauschleuse und der Hornbeker Kammerschleuse für den Zeitraum nach dem Öffnen der Stauschleuse in Abb. 22 dargestellt. Erkennbar ist, wie sich die Sunkwelle mit zunehmenden Abstand zur Zienburger Schleuse abschwächte; aufgrund des Sohlgefälles wurde die Welle flacher und beschleunigte. Die Höhe der Sunkwelle betrug rund 15 cm, wenn sie am Unterhaupt der Hornbeker Schleuse angelangt war. Dort wurde sie reflektiert und verlief nunmehr stromabwärts. Aus der Überlagerung der hin- und zurücklaufenden Wellentäler (an der festen Schleusentoren wird ein Wellental als Wellental und ein Wellenberg als Wellenberg reflektiert) kam es zur Bildung von sog. Stehenden Wellen.¹²² Diese äußern sich darin, dass sich der Wasserstand, bezogen auf einen Standort über die Zeit, hebt und senkt (Abb. 21, Linie a und Abb. 22; jeweils $t > 17,5$ h).

¹²² Heinemann und Feldhaus 2003, 262 f.; vgl. auch Fußnote 83.

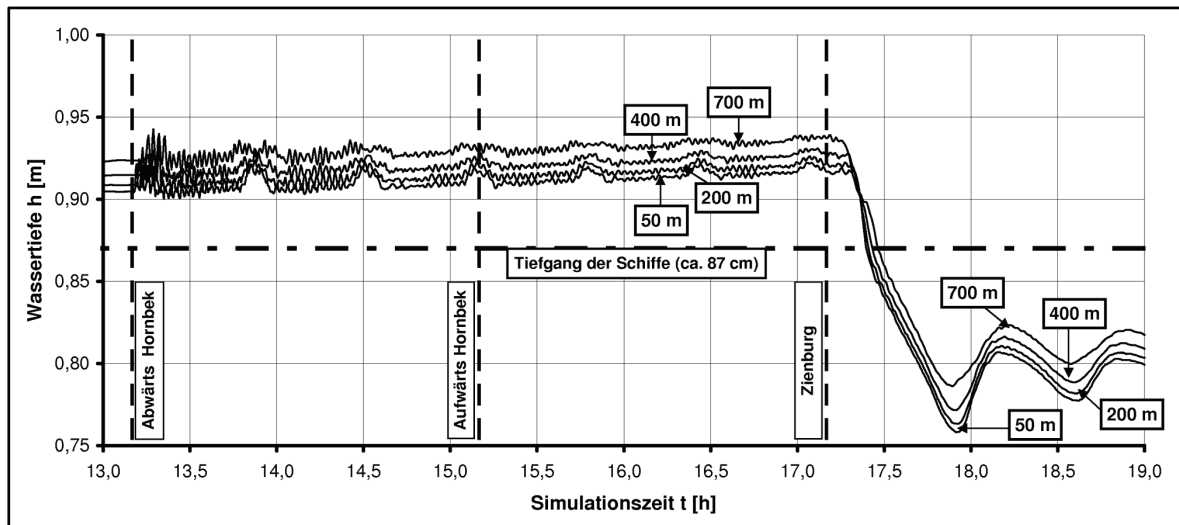


Abb. 22: Szenario 1 – Verlauf der Wassertiefen für verschiedene Stationen unterhalb der Hornbeker Kammer-schleuse (angegeben ist der unterwasserseitige Abstand zum Unterhaupt der Kammer-schleuse).

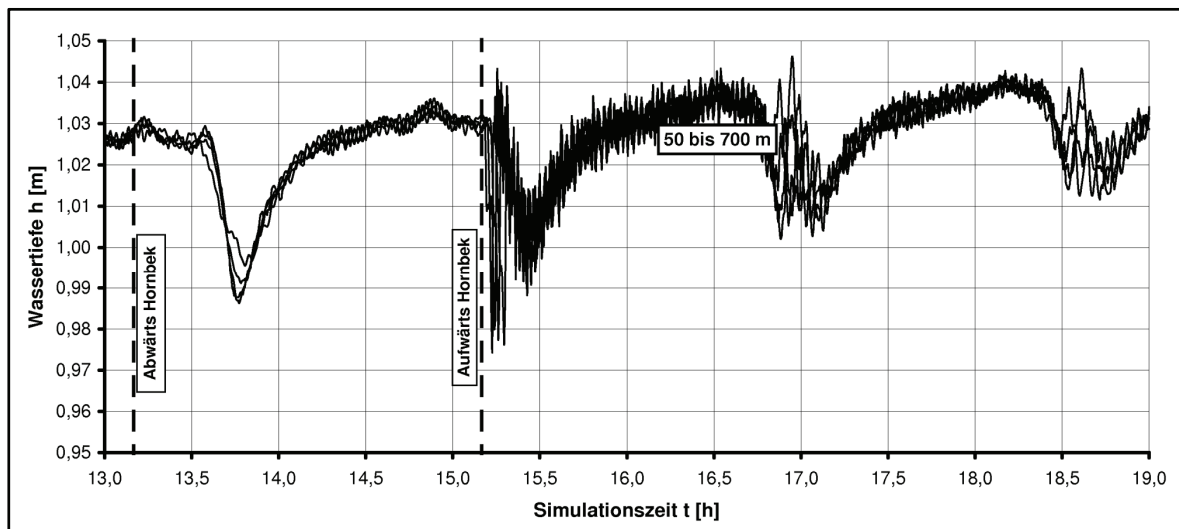


Abb. 23: Szenario 1 – Verlauf der Wassertiefen für verschiedene Stationen oberhalb der Hornbeker Kammer-schleuse in der Scheitelhaltung (angegeben ist der oberwasserseitige Abstand von 50, 200, 400 und 700 m zum Oberhaupt der Kammer-schleuse). Die Differenz in den Wassertiefen ist gering und daher hier nicht darstellbar.

Außerdem kann der Abb. 22 (ab $t = 13$ h) entnommen werden, dass sich die Abwärts-schleusung an der Hornbeker Schleuse kaum auf den Wasserstand in der unterwasserseitigen Kanalhaltung auswirkte, was auf ein vergleichsweise geringes Kammervolumen zurückzuführen ist (s. Tab. 4). Nichtsdestoweniger sind auch in diesem Kanalabschnitt die

Schwallwellen erkennbar, wie sie mit einem bestimmten Zyklus zwischen den geschlossenen Schleusentoren pendelten.

In Abb. 23 sind die Wassertiefen in der Scheitelhaltung oberhalb der Hornbeker Kammer-schleuse dargestellt. Zum Zeitpunkt $t \approx 13,5$ h durchlief eine Sunkwelle den Kanalabschnitt.

Diese resultierte aus der Aufwärtsschleusung an der oberen Hahnenburger Schleuse zum Simulationszeitpunkt $t = 11$ h (ausgehend vom zuvor erläuterten 80-minütigen Zyklus war diese Sunkwelle bereits zum zweiten Mal an der Hornbeker Schleuse angelangt, d. h. sie war bereits dreimal durch die gesamte Scheitelhaltung gelaufen). Sie stand daher nicht im Zusammenhang mit der Abwärtsschleusung an der Hornbeker Schleuse ($t = 13$ h).

Eine weitere Sunkwelle entstand durch die Aufwärtsschleusung an der Hornbeker Schleuse (Füllen der Schleusenkammer mit Wasser aus der Scheitelhaltung bei $t = 15$ h). Diese Sunkwelle überlagerte sich direkt mit jener aus der Aufwärtsschleusung an der Hahnenburger Kammerschleuse resultierenden Sunkwelle.

Sowohl die Scheitelhaltung als auch die Hahnenburger Schleusentreppe (mit Ausnahme eines Abschnittes von rund 160 m Länge zwischen den Kammerschleusen für die Dauer von etwa 5 Stunden; Abb. 17, $t = 10$ bis 15 h) haben über den gesamten Simulationszeitraum eine ausreichende Wassertiefe gehabt. Ein dauerhafter Schifffahrtsbetrieb war unter den zugrunde gelegten Randbedingungen möglich. Unterhalb der Hornbeker Kammerschleuse konnte die Schifffahrt nach dem Öffnen der Zienburger Stauschleuse nur durch Zugabewasser aus der Scheitelhaltung ermöglicht werden (zur Größe des Abflusses aus der Scheitelhaltung an den einzelnen Schleusenanlagen s. folgenden Abschnitt).

Der zeitliche Öffnungsvorgang der Kammerschleusen (Ziehen der Schützbretter) entsprach nicht zwangsläufig dem an den Stauschleusen, wie es simuliert worden ist. Bei den Kammerschleusen ist durchaus denkbar, dass die Schützbretter zur Minderung von Turbulenzen in den Schleusenkammern und Vorhäfen wesentlich langsamer gezogen wurden. Schließlich war man nicht, wie bei der Fahrt auf Schwellung, auf die Ausnutzung der Schwallwelle angewiesen.

b) Wasserbilanz

Anhand der Schleusungszeitpunkte und der Verteilung des „überschüssigen“ Wassers (vgl. Abs. 7.3 und 8.1.1) konnte geregelt werden, wann und wie lange der kritische Kanalabschnitt zwischen den beiden Hahnenburger Kammerschleusen schiffbar war. Insbesondere für die Richtung Lauenburg fahrenden Schiffe stellte sich hierbei das Problem ein, dass nach jeder Aufwärtsschleusung an der unteren Kammerschleuse die Wassertiefe (zumindest für voll abgeladene Schiffe) zunächst nicht ausreichend war, um zur oberen Schleuse zu gelangen. Sie mussten warten, bis die Wassertiefe im betreffenden Kanalabschnitt infolge des aus der Scheitelhaltung zufließenden Wassers genügend angestiegen war.

Unter Beachtung einer möglichst ausgeglichenen Wasserbilanz wurden in der Simulation unterschiedliche wasserstandsabhängige Funktionen für die Wasserabgabe angesetzt. Die mittleren Abflüsse in den Zeiträumen zwischen den Schleusungen betragen demnach etwa:

- Obere Hahnenburger Kammerschleuse:
im Mittel etwa 87 l/s;
- Untere Hahnenburger Kammerschleuse:
im Mittel etwa 38 l/s;
- Hornbeker Kammerschleuse:
im Mittel etwa 36 l/s.

Der Abfluss an der oberen Hahnenburger Kammerschleuse (87 l/s) war deutlich größer als an den anderen Schleusen. Für einen kontinuierlichen Betrieb kann hieraus geschlossen werden, dass hier möglicherweise gezielt ein oder mehrere Schützbretter zur Erhöhung des Zugabewasserabflusses gezogen waren (Erreichung des Falles 2 in Abs. 7.3). Die Dauer der Nichtschiffbarkeit dieses Kanalabschnittes (Abb. 17, $t = 10$ bis 15 h) konnte hierüber geregelt werden. Die Abflüsse an den anderen Schleusen (36 bzw. 38 l/s) sollten als Spaltwasserverluste interpretiert werden.

Die ausgeglichene Wasserbilanz kann für einen in sich geschlossenen Simulationszyklus (hier: 1 Tag) überprüft werden, indem der Wasserstand in der Scheitelhaltung (unter

Vernachlässigung möglicher Schwall- und Sunkwellen) zu Beginn und zum Ende dieser Serie gegenübergestellt werden. Für vorliegende Simulation zeitigt dieser Vergleich eine gute Übereinstimmung. (vgl. hierzu Abb. 17, Linie a und Abb. 21, Linie b).¹²³

8.1.4 Schlussfolgerungen (Szenario 1)

Vor dem Hintergrund eines ausreichenden Wasserdargebotes und des verhältnismäßig geringen Wasserverbrauchs der Kammer-schleusen ist das von Rehder im Jahr 1890 skizzierte Bild der Stecknitzfahrt im Bereich der Hahnenburger Schleusentreppe und der Scheitelhaltung schlüssig. Der Wasserstand in den betreffenden Kanalhaltungen zwischen den Kammerschleusen konnte zeitabhängig so reguliert werden, dass die Tal- und die Berg-fahrt (mit Unterbrechungen) möglich war. Bei einer angenommenen Abflusspende von etwa $5,26 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ für die Scheitelhaltung waren täglich jeweils eine Berg- und eine Talschleu-sung (an beiden Kammerschleusen) möglich. Somit konnte nachgewiesen werden, dass unter Berücksichtigung der hydrologischen und hydraulischen Randbedingungen sowie nach den geometrischen Angaben von Rehder für den Betriebszeitpunkt um 1890 ein dauerhafter Betrieb der Hahnenburger Schleusen-treppe mit zwei Kammerschleusen bei mittlere-n Abflussverhältnissen möglich gewesen ist. Es muss allerdings davon ausgegangen werden, dass es in der trockenen Sommerperioden aufgrund geringerer Zuflüsse zu einer Unterbrechung des Betriebes kommen konnte (vgl. Abs. 4, Abb. 8).

¹²³ Tatsächlich steigt der Wasserstand in der Scheitelhaltung im Simulationszyklus um etwa 6 cm. Da allerdings die Anpassung der Spaltwasserabgaben in Abhängigkeit des jeweiligen Simulationsergebnisses iterativ erfolgen muss, wird in vorliegender Arbeit auf eine weitere Verbesserung der Wasserbilanz verzichtet. Eine weitere iterative Verbesserung zöge für jede Simulation eine mehrstündige Neuberechnung mit nicht grundlegend unterschiedlichen Ergebnissen nach sich.

8.2 Szenario 2: Rekonstruierte Hahnenburger Schleusentreppe um 1400 mit Stauschleusen

Im Folgenden wird ein rekonstruierter Betriebszustand um 1400 untersucht. Hierfür wurden im Bereich der Hahnenburger Schleusentreppe zwei Stauschleusen angeordnet. Am südlichen Abschluss wurde sowohl die Zienburger Stauschleuse als die Seeburger Stauschleuse einbezogen.¹²⁴

In Abb. 24 sind die geometrischen Modellierungsparameter zusammengestellt. Außerdem sind die Anfangswasserstände und an den Modellgrenzen Überfälle angegeben, die als Anfangsrandbedingungen zur Lösung des numerischen Modells definiert sein müssen. Die Zuflüsse orientierten sich an Abs. 4. Zur Anwendung kam ausschließlich das Querschnittsprofil 1 nach Abb. 7. Die zur Schifffahrt erforderliche Wassertiefe betrug zum untersuchten Zeitpunkt etwa 40 cm (vgl. Tab. 1).

Die Sohlhöhendifferenz zwischen der Scheitelhaltung und dem Einlauf in den Möllner See orientierte sich an den Angaben von Rehder aus dem Jahr 1890. Vorausgesetzt, dass während des knapp 500-jährigen Betriebes eine Vertiefung des Scheitelkanals und somit eine Verringerung der Höhendifferenz erfolgte, wäre das tatsächliche Sohlgefälle um 1400 größer als das angenommene (etwa 11 %, Höhendifferenz 4,43 m auf einer Länge von 390 m). Zur Beurteilung der Schiffbarkeit liegt die Annahme eines geringeren Sohlgefälles „auf der sicheren Seite“, da dann Schwallwellen langsamer und mit einer größeren Wassertiefe abfließen.

Am südlichen Abschluss der rund 11,3 km langen Scheitelhaltung befand sich die Zienburger Stauschleuse. Der Bau der Hornbeker Stauschleuse erfolgte erst Ende des 17. Jahrhunderts als Stauschleuse (vgl. Abs. 2.2.2).

¹²⁴ Bezogen auf die Scheitelhaltung reduziert eine möglichst große Ausdehnung des Modells die Auswirkungen möglicherweise unpassend formulierter Anfangsrandbedingungen.

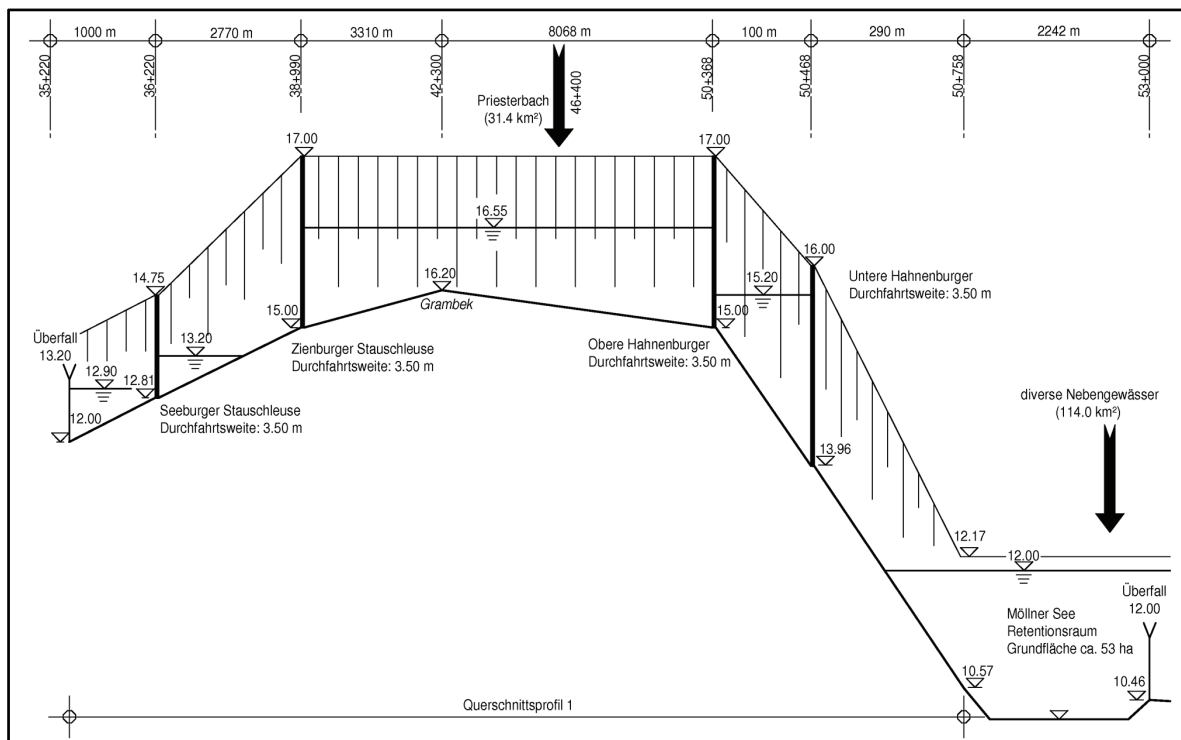


Abb. 24: Darstellung der maßgeblichen geometrischen Modellierungsparameter für das Szenario 2 für einen rekonstruierten Betriebszustand um 1400. Angegeben sind neben der Schleusengeometrie, die Zuflüsse, die Sohl- und Böschungshöhen sowie für das numerische Modell die erforderlichen Anfangswasserstände und an den Modellgrenzen Überfälle als Randbedingungen (ohne Maßstab).

Zur Bestimmung der Höhenlage der Zienburger Stauschleuse wurde davon ausgegangen, dass im Zusammenhang mit dem Bau der ersten Kammerschleuse von Hornbek in den Jahren 1829/30 eine Vertiefung der Kanalhaltung zwischen Hornbek und Zienburg erfolgte (vgl. hierzu Abb. 4).¹²⁵ Von Rehder wurde 1890 eine Höhenlage von 13,69 mNN für den Drempe der Zienburger Schleuse angegeben (Tab. 4). In dieser Simulation wurde eine Drempehöhe von 15,00 mNN angenommen. Sie entspricht derjenigen der oberen Hahnenburger Stauschleuse.

Von Behrens wird zu einem Zeitpunkt vor dem Bau der Hornbeker Kammerschleuse 1829/30 (und vermutlich vor der Vertiefung des Kanalbettes 1821-23) ein „Rücken“ in der

Scheitelhaltung bei Grambek beschrieben, welcher sich *nach beiden Seiten* um 1,20 m neigt (vgl. Abs. 2.2). Demnach müsste die Höhenlage der Zienburger Stauschleuse derjenigen der oberen Hahnenburger Stauschleuse entsprochen haben. Die von Behrens genannte Sohlerrhöhung („*beym Dorfe Grambek*“)¹²⁶ wird am späteren Standort der Hornbeker (oder: Grambeker) Schleuse bei Station 42+300 angenommen (s. Abb. 24).

Zur Begrenzung der Stauhöhe wurde die obere Hahnenburger Stauschleuse direkt am Übergang von der verhältnismäßigen flachen Scheitelhaltung zum Abstieg Richtung Möllner See platziert. Bei einer zu großen Stauhöhe vor der oberen Stauschleuse würde der Wasserverlust der Scheitelhaltung zu groß werden, um innerhalb eines für den Schiffahrtsbetrieb vertretbaren Zeitraumes durch

¹²⁵ Kurz zuvor (in den Jahren 1821 bis 1823) erfolgte ebenfalls eine Vertiefung der Scheitelhaltung (vgl. Abs. 3.4).

¹²⁶ Behrens 1818, 7.

natürliche Zuflüsse ausgeglichen zu werden. Der Ansatz der unteren Stauschleuse in einem Abstand von lediglich 100 m zur oberen erfolgte unter konstruktiven Aspekten zur Begrenzung der Torbeanspruchung durch Wasserdruckkräfte.

Inwieweit eine Verschiebung der beiden Hahnenburger Stauschleusen auf- oder abwärts den Betrieb negativ bzw. positiv beeinflusst hätte, wird in Abs. 8.2.3 diskutiert.

8.2.1 Schleusungszyklen

Es ist davon auszugehen, dass an der nach beiden Seiten mit Stauschleusen abgeschlossenen Scheitelhaltung aufgrund des großen Wasserverlustes nicht täglich geschleust werden konnte. Daher erfolgt die Wahl eines zweitägigen Simulationszyklus: In Anlehnung an die Zapfeltage (Tab. 3) ist anzunehmen, dass (im Gegensatz zu den Kammerschleusen) an den Stauschleusen nur alle zwei Tage geschleust wurde.

In Tab. 7 ist die Abfolge der Schleusungszeitpunkte für dieses Szenario zusammengefasst. Zunächst wurden die in der Scheitelhaltung befindlichen Schiffe abwärts in den Möllner See geschleust. Am darauf folgenden Tag erfolgten die Schleusungen an der Zienburger und der Seeburger Schleuse.

Operation		Simulationszeit [h:min]
Öffnen der Oberen Hahnenburger	Öffnen Tore	10:00 - 10:12
	Schließen Tore	10:30 - 10:36
Öffnen Unteren Hahnenburger	Öffnen Tore	12:00 - 12:12
	Schließen Tore	12:30 - 12:36
Öffnen der Zienburger Stauschleuse	Öffnen Tore	34:00 - 34:12
	Schließen Tore	34:30 - 34:36
Öffnen der Seeburger Stauschleuse	Öffnen Tore	36:00 - 36:12
	Schließen Tore	36:30 - 36:36

Tab. 7: Schleusungszyklen für Szenario 2.

Auch in diesem Szenario wurde durch das Aneinanderreihen mehrerer Zyklen in der Simulation der Einfluss möglicherweise unpassend formulierter Anfangsbedingungen

(Anfangswasserstände) minimiert. Hierbei war die Volumenkonstanz in der Scheitelhaltung innerhalb eines Schleusungszyklus zu gewährleisten. Das heißt, dass zu Beginn und am Ende einer Schleusungsreihe der Wasserstand in der Scheitelhaltung nahezu identisch sein sollte. Durch diese Zielvorgabe wurden die Dauer der Schleusenöffnungen und die Größe der Wasserabgaben maßgeblich beeinflusst. Schließlich mussten beide Parameter solange iterativ angepasst werden, bis die Volumenkonstanz erreicht wurde. Nur so wäre aus hydrologischer Sicht ein dauerhafter Betrieb möglich. Inwieweit die dann zugrunde gelegten Wasserabgaben und die Dauer der Schleusenöffnungen noch den betrieblichen (möglichen) Randbedingungen entsprachen, ist zu prüfen.

8.2.2 Simulationsergebnisse

a) Wassertiefen

Die Wassertiefen für unterschiedliche Haltungen im Bereich der Hahnenburger Schleusentreppe sind in Abb. 25 für einen Simulationszyklus zusammengefasst.¹²⁷ In der Scheitelhaltung (Abb. 25, Linie b) war stets eine ausreichende Wassertiefe vorhanden. Lediglich durch das Öffnen einer der beiden Abschlusschleusen kam es zu einer Sunkwelle.

Die Kanalhaltung unterhalb der oberen Hahnenburger Schleuse (Abb. 25, Linie c) füllte sich mit dem Öffnen von dieser. Die maximale Stauhöhe wurde durch die Höhe des Tores an der unteren Stauschleuse bestimmt. Wurde diese geöffnet, ergoss sich eine Schwallwelle ins Unterwasser und die oberwasserseitige Haltung fiel zunächst trocken.

¹²⁷ Alle in den folgenden Diagrammen angegebenen Simulationszeiten t beziehen sich auf den Zyklus nach Tab. 7.

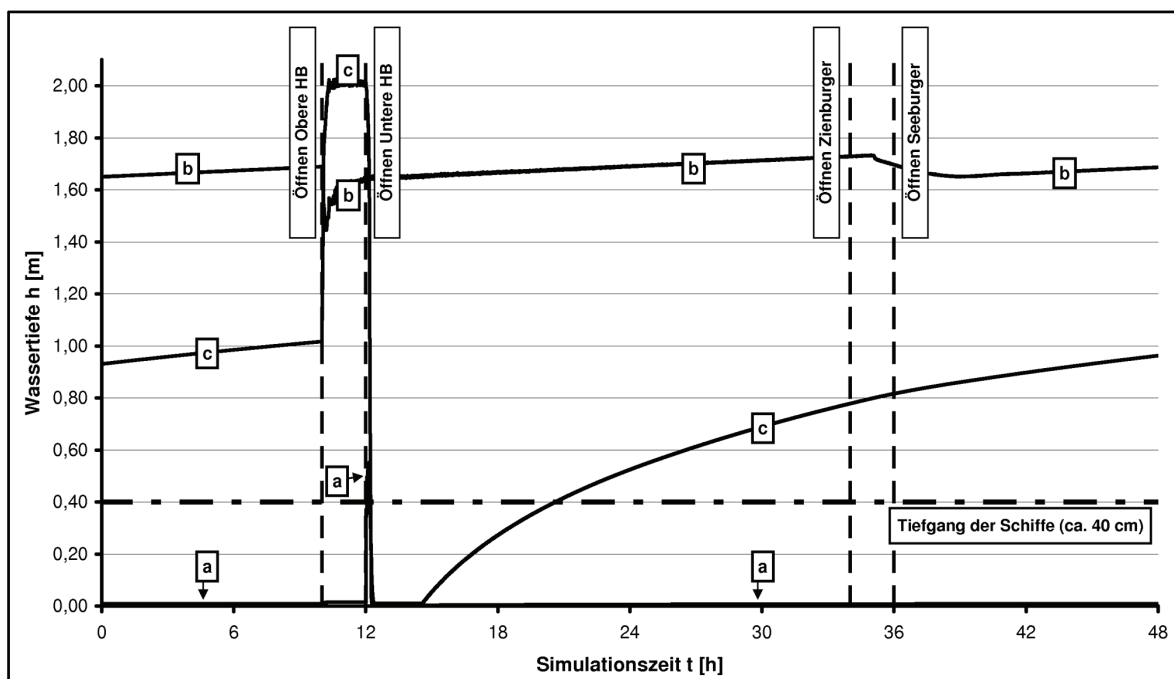


Abb. 25: Szenario 2 – Verlauf der Wassertiefen für verschiedene Kanalabschnitte im Bereich der Hahnenburger Schleusentreppe über einen Simulationszyklus: (a) 50 m unterhalb der unteren Hahnenburger Stauschleuse [Übergang zum Möllner See]; (b) 50 m oberhalb der oberen Hahnenburger Stauschleuse [Scheitelhaltung]; (c) 50 m unterhalb der oberen Hahnenburger Stauschleuse).

Erst allmählich kam es infolge von Wasserabgaben aus der Scheitelhaltung zu einem schiffbaren Wasserstand (Abs. 7.3, dort Fall 2).

Unterhalb der unteren Stauschleuse war über nahezu den gesamte Zeitraum eine sehr geringe Wassertiefe ($h < 1$ cm) vorhanden (Abb. 25, Linie a), welche einen quasi stationären Abflusszustand darstellte. Dieser resultierte aus dem Spaltwasserabfluss der unteren Stauschleuse. Nur ein sehr kurzer Zeitraum nach dem Öffnen der oberen Stauschleuse ermöglichte in diesem Kanalabschnitt eine ausreichende Wassertiefe (Abb. 25, Linie a und Abb. 26, jeweils bei $t = 12$ bis 12,5 h).

In Abb. 26 sind die Wassertiefen für den relevante Simulationszeitraum unterhalb der unteren Hahnenburger Stauschleuse detaillierter dargestellt. Die Schwallwelle hatte bei einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von 3,9 m/s

eine maximale Höhe von etwa 54 cm¹²⁸ und eine Dauer von rund 15 Minuten. Die Fließgeschwindigkeit betrug etwa 2,3 m/s. Die Dauer der Schwallwelle wurde durch das oberwasserseitig gespeicherte Wasservolumen bestimmt, da diese Haltung mit dem Öffnen der unteren Hahnenburger Stauschleuse trocken fiel. Die für die Schifffahrt erforderliche Wassertiefe wurde für lediglich rund 10 Minuten erreicht. Dieser Zeitraum war dennoch die einzige Möglichkeit für die Schiffe, bergwärts zu gelangen. Inwieweit dieser Abflusszustand den Schifffahrtsbetrieb erlaubt hätte, wird in Abs. 8.2.3 diskutiert.

Unterhalb der unteren Stauschleuse kam es zu einer Reflexion der Wellen am Übergang zum Möllner See.

¹²⁸ Zum Vergleich: Rehder gibt für die Höhe der Schwallwellen an der Berkenthiner Schleuse einen Wert von 80 cm an (vgl. Abs. 3.3).

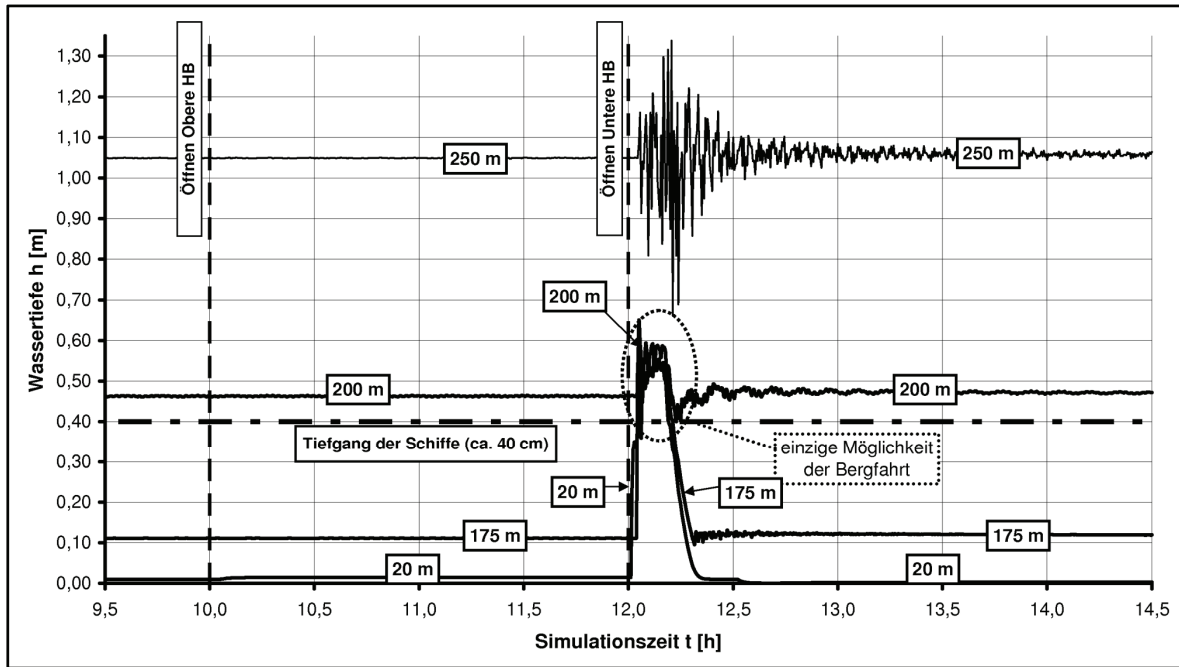


Abb. 26: Szenario 2 – Verlauf der Wassertiefen für verschiedene Stationen unterhalb der unteren Hahnenburger Stauschleuse (angegeben ist der unterwasserseitige Abstand zum Schleusentor).

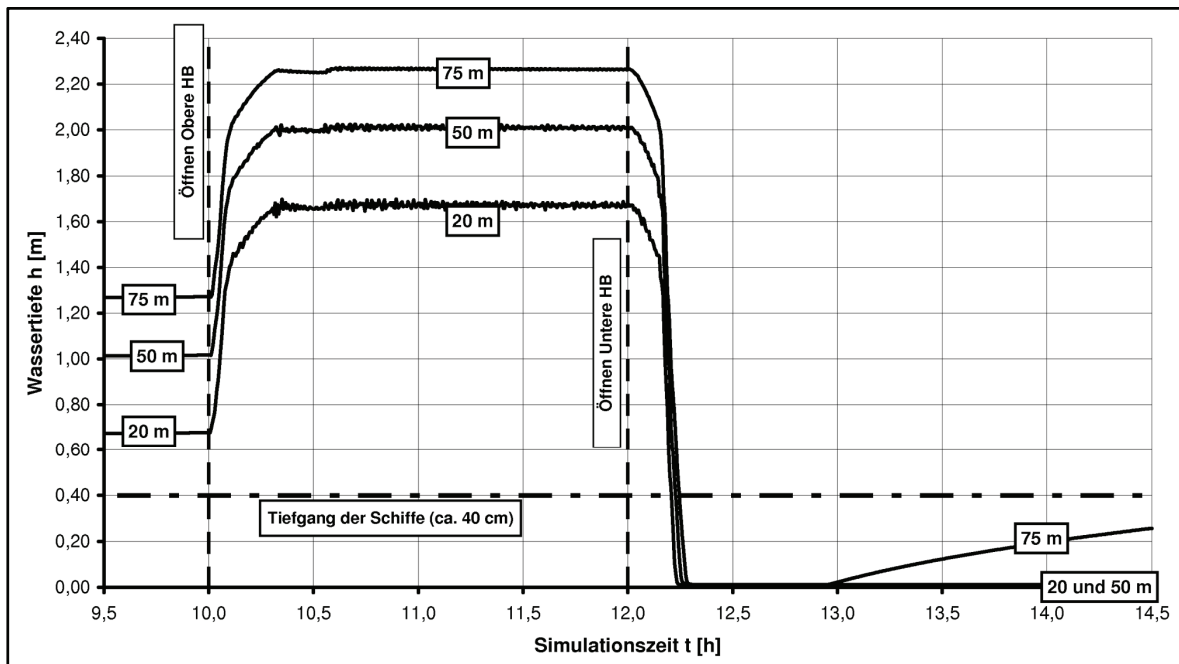


Abb. 27: Szenario 2 – Verlauf der Wassertiefen für verschiedene Stationen unterhalb der oberen Stauschleuse (angegeben ist der Abstand zum Schleusentor).

Schwall- und Sunkwellen werden an einem freien Ende, wie einer Aufweitung oder einem See (im Gegensatz zu einem festen Ende wie einem Schleusentor), mit umgekehrten Vorzeichen reflektiert.¹²⁹ Hierdurch ist der oszillierende Wasserstand unterhalb der Schleuse erklärbar (Abb. 26, Abstand 250 m, $t > 12$ h). Folge war eine Verstärkung der einzelnen Schwallwellen. Innerhalb von 20 Sekunden kam es zu Änderungen in der Wasserspiegelhöhe von bis zu 60 cm. Die Gesamtdauer dieser Turbulenzen betrug etwa 10 Minuten. Es ist in Frage zu stellen, ob die Prähme des ausgehenden 14. Jahrhunderts diesen Anforderungen gewachsen waren, denn genau zum Zeitpunkt des Auftretens dieser Turbulenzen müsste sich ein talfahrendes Schiff in diesem Abschnitt befunden haben.

Die maximale Wassertiefe in der Haltung zwischen beiden Hahnenburger Stauschleusen wurde durch die Torhöhe der unteren Stauschleuse bestimmt. Mit dem Öffnen der oberen Stauschleuse füllte sich diese Haltung (Abb. 27, $t > 10$ h).

Aufgrund des verhältnismäßig großen Sohlgefälles, der Kürze der Haltung und der erforderlichen Dauer der Schleusenöffnung an der

oberen Stauschleuse musste sich der Wasserspiegel in dieser Haltung dem der Scheitelhaltung angleichen. Da ein frühzeitiges Schließen der Tore aufgrund des großen Energieliniengefälles zwischen Ober- und Unterwasser praktisch kaum möglich gewesen sein dürfte, ergibt sich hieraus (trotz eines Torabstandes von 100 m) das Prinzip der Kammerschleuse. Der Wasserspiegel zwischen beiden Stauschleusen hatte sich bereits nach rund 12 Minuten ausgeglichen. Dieser Vorgang entspricht dem Füllen der Kammer einer Kammerschleuse zum Zweck der Bergschleuse (vgl. Abb. 3, rechts).

Oberhalb der oberen Stauschleuse entstand nach der Öffnung eine Sunkwelle mit der Höhe von rund 28 cm (Abb. 25; Linie b oder Abb. 28, jeweils $t = 10$ h) und einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von etwa 2,1 m/s. Diese durchlief die Scheitelhaltung und flachte sich hierbei aufgrund des Sohlhochpunktes bei Grambek ab.

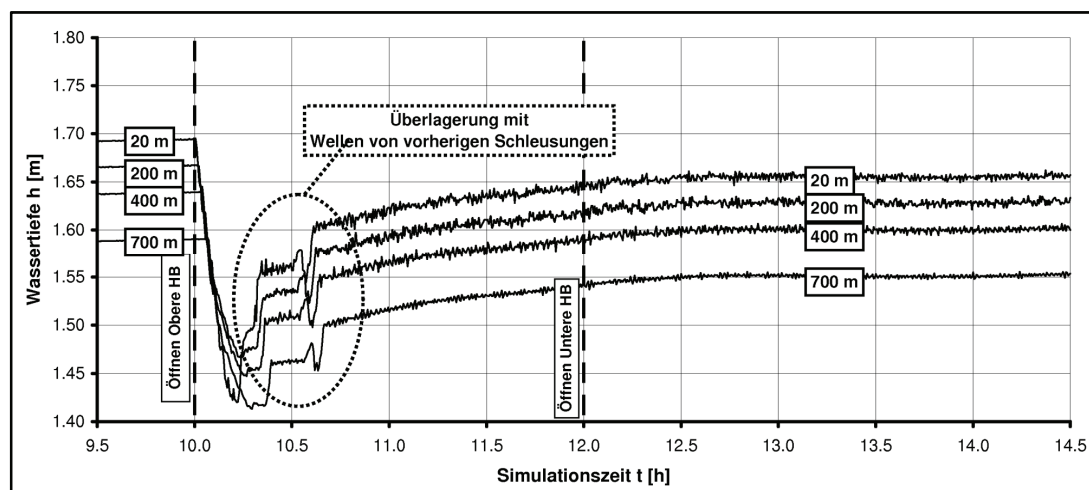


Abb. 28: Szenario 2 – Verlauf der Wassertiefen für verschiedene Stationen oberhalb der oberen Stauschleuse in der Scheitelhaltung (angegeben ist der Abstand zum Schleusentor).

¹²⁹ vgl. Heinemann und Feldhaus 2003, 263; s. a. Fußnote 83.

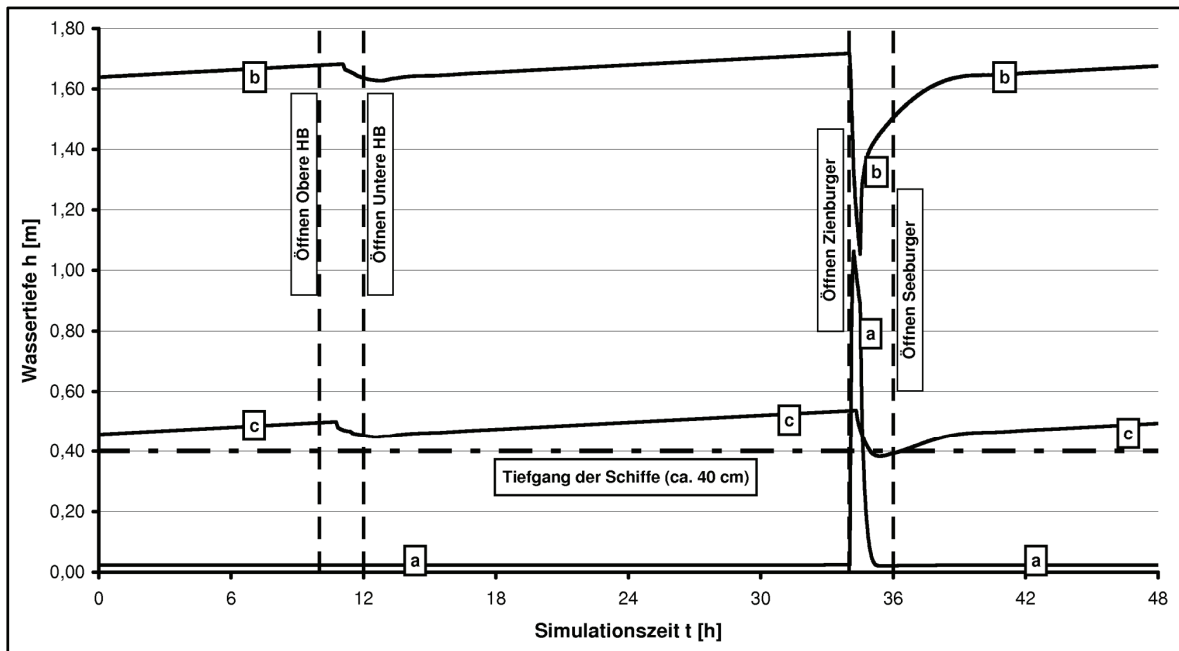


Abb. 29: Szenario 2 – Verlauf der Wassertiefen für verschiedene Kanalabschnitte im Bereich der Zienburger Stauschleuse am südlichen Abschluss der Scheitelhaltung über einen Simulationszyklus: (a) 50 m unterhalb der Zienburger Stauschleuse; b) 50 m oberhalb der Zienburger Stauschleuse [Scheitelhaltung]; c) Station 42+300 [entspricht dem höchsten Sohlpunkt der Scheitelhaltung]).

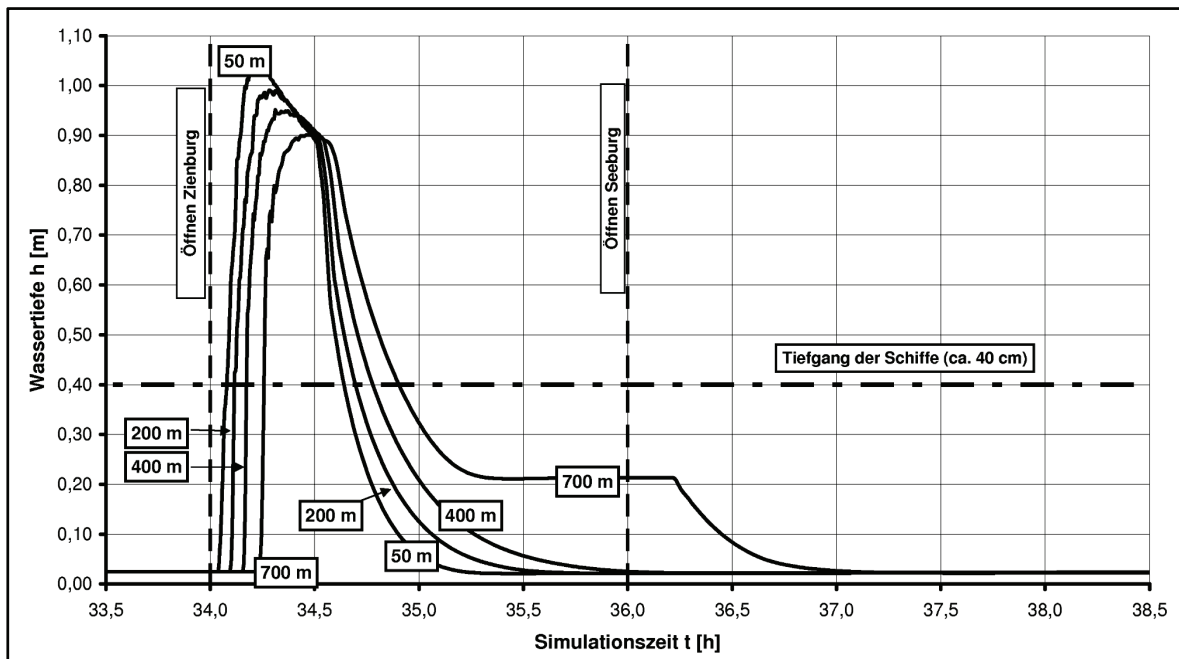


Abb. 30: Szenario 2 – Verlauf der Wassertiefen für verschiedene Stationen unterhalb der Zienburger Stauschleuse (angegeben ist Abstand zum Schleusentor).

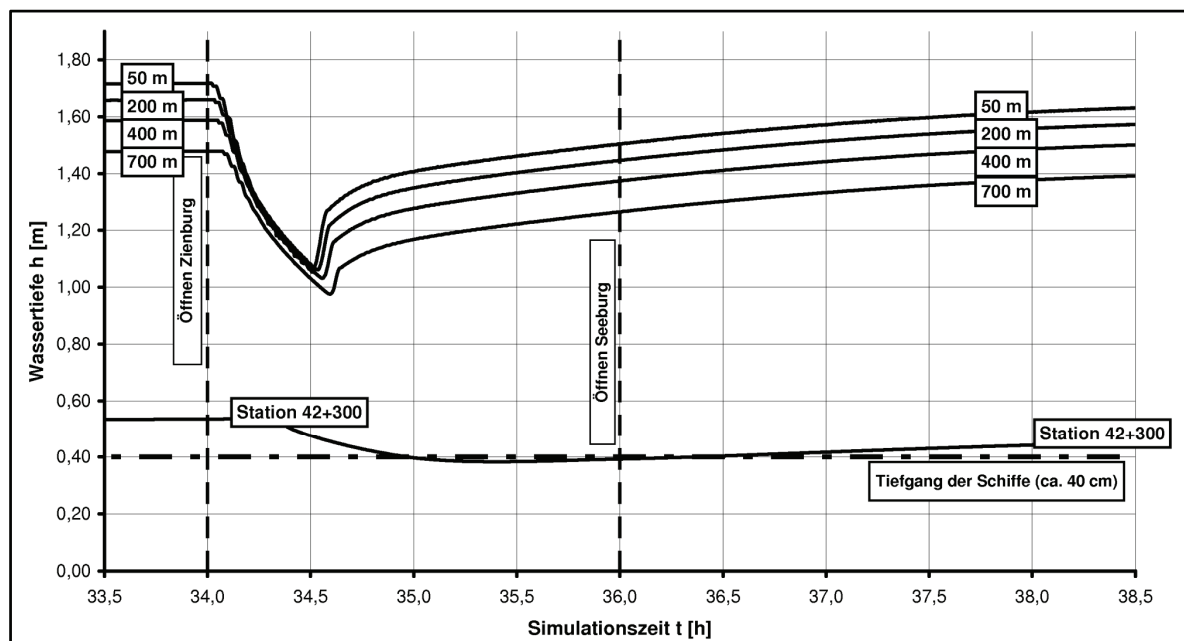
Nach etwa 90 Minuten war die Sunkwelle deutlich abgeschwächt mit einer Höhe von etwa 5 cm an der Zienburger Stauschleuse angelangt (Abb. 29, Linie b, $t \approx 11,5$ h). Die Höhe der Sunkwelle nach dem Öffnen der Zienburger Stauschleuse (ca. 66 cm; vgl. Abb. 29, Linie b; $t = 34$ h) war deutlich größer als diejenige an der oberen Hahnenburger Schleuse, weil hier der Abfluss des Wassers ungehindert erfolgen konnte. Bei der oberen Hahnenburger Schleuse war dieser durch das untere Schleusentor behindert. Die Schiffbarkeit in der Scheitelhaltung war fast durchgehend gewährleistet. Allein am Sohlhochpunkt bei Grambek (Station 42+300) konnte es kurzzeitig beim Durchlaufen einer Sunkwelle zu einer Unterschreitung des schiffbaren Wasserstandes kommen (Abb. 29, Linie c, und Abb. 31, jeweils $t = 35$ h).

Die Berg- als auch die Talfahrt in der Haltung zwischen Zienburg und Seeburg war nur nach Öffnen der Stauschleuse „auf Schwellung“ möglich (Abb. 30, $t = 34$ bis 35 h). Bei einer Höhe der Schwallwelle von über einem Meter hatte sie eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von lediglich 0,7 m/s. Dieser vergleichsweise geringe Wert (zum Vergleich: an der unteren Hahnenburger Stauschleuse wurde die Aus-

breitungsgeschwindigkeit zu 3,9 m/s bestimmt) ist eine Folge des mäßigen Sohlgefälles ($I \approx 0,8$ ‰) und der relativ geringeren Wasserspiegeldifferenz vor der Schleusenöffnung ($\Delta h = 1,75$ m). Die Fließgeschwindigkeit betrug maximal etwa 1,0 m/s.

Der Bereich unterhalb der Zienburger Stauschleuse fiel – bis auf die Spaltwasserverluste – ansonsten wieder trocken. Die Stauwurzel oberhalb der unterwasserseitig gelegenen Seeburger Schleuse begann in einem Abstand von etwa 1.100 m von der Zienburger Schleuse. Diese Strecke mussten die Schiffe „auf der Welle“ zurücklegen. Ihnen verblieben hierfür knapp 40 Minuten, bis sich der Wasserstand unter ein schiffbares Niveau gesenkt hatte (erforderliche „Reise“-geschwindigkeit: 1,65 km/h bzw. 0,46 m/s). Die talfahrenden Schiffe dürfte die Strecke unter Ausnutzung der Fließgeschwindigkeit in dieser Zeit bewältigt haben. Ob die Bergfahrer ausreichend schnell gegen die Strömung getreidelt werden konnten, ist fraglich.

Abb. 31: Szenario 2 – Verlauf der Wassertiefen für verschiedene Stationen oberhalb der Zienburger Stauschleuse in der Scheitelhaltung (angegeben ist der Abstand zum Schleusentor).



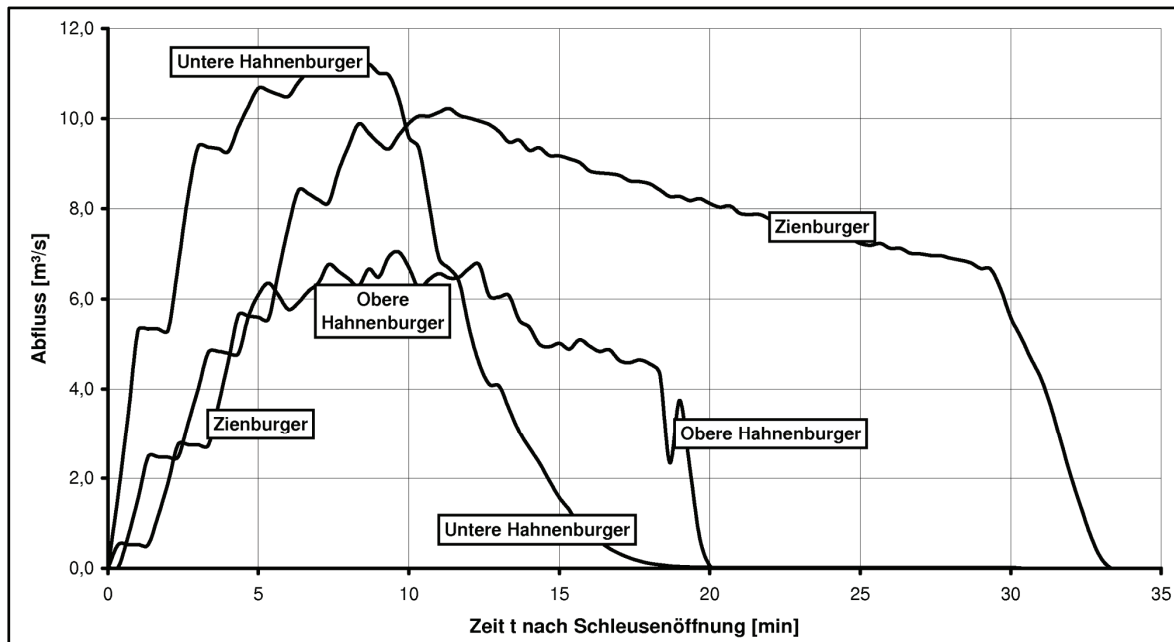


Abb. 32: Szenario 2 – Abflussganglinien nach dem Öffnen der Stauschleusentore.

Durch das Verschließen des Schleusenquerschnittes kam es zu einem Absperrschwall, welcher sich ebenso ins Oberwasser fortsetzte. Dieses ist in Abb. 31 am rasch steigenden Wasserstand ($t = 34,5$ h) erkennbar.

b) Wasserbilanz

Die vorliegende Simulation wurde anhand eines ausgeglichenen Wasserhaushaltes im Simulationszyklus kalibriert. Dies bedingt zum einen, die Wasserabgaben auf ein Mindestmaß zu reduzieren, andererseits die Öffnungszeit der Stauschleusen verhältnismäßig kurz zu halten. Daher ist zu prüfen, inwieweit beide Parameter den tatsächlichen historischen Betriebsbedingungen gerecht werden. In Abb. 32 sind die Abflussganglinien für die drei betrachteten Stauschleusen nach deren Öffnung dargestellt. Die größte Abflussspitze trat an der unteren Hahnenburger Stauschleuse auf ($Q_{\max} = 11,2 \text{ m}^3/\text{s}$), da hier die größte Wasserspiegeldifferenz¹³⁰ vor der Schleusen-

öffnung vorhanden war ($\Delta h = 2,5$ m gegenüber $1,25$ m bei der oberen Hahnenburger und $1,75$ m bei der Zienburger Schleuse). Allerdings fiel die Abfluss an der unteren Hahnenburger Stauschleuse relativ schnell auf den Nullwert. Die Haltung war „leergelaufen“.

Bei der oberen Hahnenburger Stauschleuse endete nach etwa 18 Minuten der Abfluss: Der Wasserspiegel in der unterwasserseitigen Haltung hatte sich dem der Scheitelhaltung angeglichen.

Bei der Zienburger Schleuse unterbrach nach 30 min der einsetzende Schleusenschließungsvorgang¹³¹ den Abfluss. Zu diesem Zeitpunkt betragen das Energieliniengefälle noch 15 % und die Fließgeschwindigkeit etwa $1,8 \text{ m/s}$. Das Schließen der Tore dürfte bei diesen Bedingungen nur unter Verwendung verhältnismäßig kleiner Schüttbretter (mehre-

haltung (zu diesem Simulationszeitpunkt etwa $16,5 \text{ mNN}$) nach dem Öffnen der oberen überströmt. Das Überströmen wurde im Modell ausgeschlossen, so dass sich eine Wasserspiegeldifferenz von etwa $2,50 \text{ m}$ ergibt (Sohlhöhe der unteren Stauschleuse: $13,96 \text{ mNN}$; vgl. Abb. 24).

¹³¹ Dieser wurde analog zu Tab. 5 simuliert.

¹³⁰ Tatsächlich würde das Tor der unteren Stauschleuse (Toroberkante im Modell: $16,0 \text{ mNN}$; vgl. Abb. 24) aufgrund der höheren Wasserspiegellage in der Scheitel-

re übereinander gesetzte Bretter pro Wehrfeld) möglich gewesen sein. Andernfalls wäre ein ungleich größeres Wasservolumen aus der Scheitelhaltung abgeflossen, welches über einen entsprechend längeren Zeitraum durch natürliche Zuflüsse hätte ausgeglichen werden müssen.

Anhand einer Integration der Abflussganglinien über die Dauer kann das Wasservolumen berechnet werden, welches in die jeweils unterwasserseitig gelegene Haltung abgegeben wurde. Für die Zienburger Schleuse resultiert hieraus ein Volumen von 13.700 m³ und für die obere Hahnenburger Schleuse von 5.900 m³.

Auf die gleiche Weise kann das Volumen der Wasserabgaben (vgl. Abs. 7.3) über den Simulationszeitraum (zwei Tage) ermittelt werden. Dieses Volumen wurde für beide Abschlusschleusen zu jeweils rund 2.700 m³ bestimmt. Insgesamt sind der Scheitelhaltung innerhalb eines Simulationszyklus von zwei Tagen somit rund 25.000 m³ verloren gegangen.¹³²

Dem stand der natürliche Zufluss von 165 l/s gegenüber (vgl. Abs. 4). Bezogen auf den Zyklus von zwei Tagen ergibt sich hieraus ein Volumen von 28.500 m³. In der Scheitelhaltung waren also am Ende des Simulationszyklus etwa 3.500 m³ mehr Wasser gespeichert als zu Beginn. Bezogen auf die Länge der Scheitelhaltung von rund 11,3 km und einer mittleren Wasserspiegelbreite von 10 m (vgl. Abb. 7, Profil 1) entspräche dieses einer Wasserstandserhöhung von etwa +3 cm. Verglichen mit Abb. 25 (dort Linie b) oder Abb. 29 (dort Linie c) stimmt diese Zusammenstellung relativ gut überein. Die Wasserbilanz innerhalb eines Simulationszyklus ist (nahezu) ausgeglichen.

Es bleibt also festzuhalten, dass der Wasserhaushalt im Wesentlichen nur aufgrund dreier

der Simulation zugrunde gelegter Bedingungen ausgeglichen ist:

- Durch ein frühzeitiges und praktisch aufgrund der hohen Fließgeschwindigkeit kaum umsetzbares Schließen der Zienburger Stauschleuse wird ein beachtliches Wasservolumen gespart. Wie zuvor erläutert, wäre es für die bergfahrenden Schiffe wünschenswert gewesen, wenn die Schleuse länger geöffnet gewesen wäre und somit für längere Zeit einen schiffbaren Wasserstand begünstigt hätte. Dem aus der Simulation ermittelten Volumen von 13.700 m³ stehen die von Behrens angegeben 54.000 m³ gegenüber, welche bei der Schleusung an der Zienburger Schleuse der Scheitelhaltung verloren gegangen seien.¹³³ Im gleichem Zusammenhang berichtet Behrens, dass nach jeder Schleusung über dem Sohlhochpunkt bei Grambek (Station 42+300) lediglich eine Wassertiefe von 8 cm bleiben würde (in dieser Simulation etwa 38 cm; vgl. Abb. 29, Linie c). Der Wasserspiegel in der Scheitelhaltung würde sich nach jeder Schleusung um etwa 10 bis 13 cm senken (in dieser Simulation etwa 10 cm). Obschon die von Behrens angegebenen Werte¹³⁴ relativ hoch erscheinen, so sprechen auch sie für eine längere Schleusenöffnung.

- Der Wasserverlust aus der Scheitelhaltung am nördlichen Abschluss wird im vorliegenden Fall durch die dicht benachbarte Anordnung beider Hahnenburger Stauschleusen begrenzt. Hiedurch ergibt sich praktisch die Funktion einer Kammerschleuse, auch wenn Ober- und Unterhaupt 100 m voneinander entfernt liegen. Vor- und Nachteile dieser Anordnung werden in Abs. 8.2.3 diskutiert worden.

- Die wasserstandsabhängigen Wasserabgaben (Abs. 7.3) sind in der Simulation zur Aufrechterhaltung eines ausgeglichenen Wasser-

¹³³ vgl. Abs. 2.2 und Behrens 1818, 7 f.

¹³⁴ Die Ausführungen von Behrens sind in diesem Punkt nicht ganz schlüssig: Wenn sich der Wasserspiegel nach der Schleusenöffnung um etwa 10 bis 13 cm senken würde und dann nur noch eine Wassertiefe von rund 8 cm zurückbliebe, betrüge die Wassertiefe maximal 21 cm. Es wäre eine Schifffahrt allenfalls mit nicht beladenen Prähmen geringen Tiefganges denkbar.

¹³² Die Wasserverluste werden hier auf den Simulationszyklus von zwei Tagen bezogen. Hierin ist jeweils eine Schleusung an der Oberen Hahnenburger und der Zienburger Schleuse einbezogen.

haushaltes sehr gering gehalten worden (hier: im Mittel etwa 31 l/s; zum Vergleich im Szenario 1: im Mittel 36 bis 87 l/s, s. Abs. 8.1.3b). Es ist in Frage zu stellen, ob zum Ende des 14. Jahrhunderts Tore konstruiert werden konnten, welche den Schleusenquerschnitt in solch einem Maße absperren. Ein Betrieb mit gezielter Zugabewasserabgabe (wie etwa in Szenario 1 durch partiell geöffnete Schüttbretter) wurde hier nicht berücksichtigt.

Aus wasserwirtschaftlicher Sicht ist also der Betrieb der nach beiden Seiten mit Stauschleusen abgeschlossenen Scheitelhaltung nur dann denkbar, wenn die Schleusungshäufigkeit deutlich reduziert wurde (seltener als alle zwei Tage). Hierfür liegen keine Hinweise vor.

c) Fließgeschwindigkeit und Sohlschubspannung

Naturgemäß traten aufgrund des großen Energieliniengefälles die größten Fließgeschwindigkeiten und die größten Sohlschubspannungen unterhalb der Stauschleusen auf. In Abb. 33 sind diese Parameter für die Station 10 m unterhalb der Zienburger Stauschleuse dargestellt. Die maximale Fließgeschwindigkeit betrug knapp 1,0 m/s bei einer maximalen Schubspannung von etwa 35 N/mm². Beides sind recht moderate Werte, welche den Schiffahrtsbetrieb nicht beeinträchtigt haben dürften. Zum Vergleich sind die kritischen Sohlschubspannungen (τ_{krit}) angegeben, bei deren Überschreitung das entsprechende Sohlmaterial in Bewegung gerät. Es kann aber unter diesen Bedingungen davon ausgegangen werden, dass die Sohle nach einer bestimmten Betriebszeit stabil ist.¹³⁵

Der Abb. 34 können die Fließgeschwindigkeit und die Schubspannung für die Haltung unterhalb der unteren Hahnenburger Stauschleuse entnommen werden. Hier betrug die maxi-

male Fließgeschwindigkeit rund 2,3 m/s und die Schubspannung bis zu 66 N/mm² (bei dieser Schubspannung gerät Geröll mit einem Durchmesser von bis zu 100 mm in Bewegung¹³⁶). Im Vergleich zu den Verhältnissen an der Zienburger Schleuse sind diese Werte ungleich größer, was auf das wesentlich größere Sohlgefälle zurückzuführen ist. Je nach anstehendem Sohlmaterial wäre bei diesen Verhältnissen möglicherweise eine fortschreitende Sohlvertiefung erfolgt, da evtl. nicht ausreichend grobkörniges Sohlmaterial zur Ausbildung einer stabilen Deckschicht vorhanden war. Diesem hätte durch die gezielte Sohlbefestigung, wie sie beispielsweise von Hogrewe beschrieben wurde¹³⁷, begegnet werden können.

d) Strömungskraft

In Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit, der ins Wasser eingetauchten Projektionsfläche des Schiffskörpers senkrecht zur Strömungsrichtung und eines Formwiderstandsbeiwertes kann die erforderliche Kraft berechnet werden, welche erforderlich ist, um die Schiffe entgegen der Strömung bergwärts zu ziehen.

Die Prähme um 1400 hatten eine Breite von etwa 2,50 m und einen Tiefgang von bis zu 40 cm (Tab. 1). Als Formwiderstandsbeiwert kann für die strömungstechnisch vermutlich ungünstig geformten Schiffe ein Wert von $c_w = 1,1$ angenommen werden.¹³⁸

Für die Strömungsverhältnisse an der Zienburger Schleuse ergibt sich demnach eine erforderliche Zugkraft von 0,6 kN und an der unteren Hahnenburger Stauschleuse von 3,6 kN. Ein erwachsener Mann ist in der Lage, über einen kurzen Zeitraum eine Zugkraft von etwa 0,8 kN aufzubringen. Für beide Standorte scheint daher das Treideln gegen die Strömung möglich, obschon an der unteren Hahnenburger Schleuse wenigstens fünf Personen erforderlich gewesen wären.

¹³⁵ Nachdem die feinen Bestandteile des Sohlsubstrats ausgewaschen sind (Abpflasterung), bildet sich eine Deckschicht aus dem zurückbleibenden, größeren Material aus. Es stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein. Die Sohle ist stabil.

¹³⁶ Schneider 2001, 13.38.

¹³⁷ Hogrewe 1780, 11 f.

¹³⁸ Jirka 2007, 194.

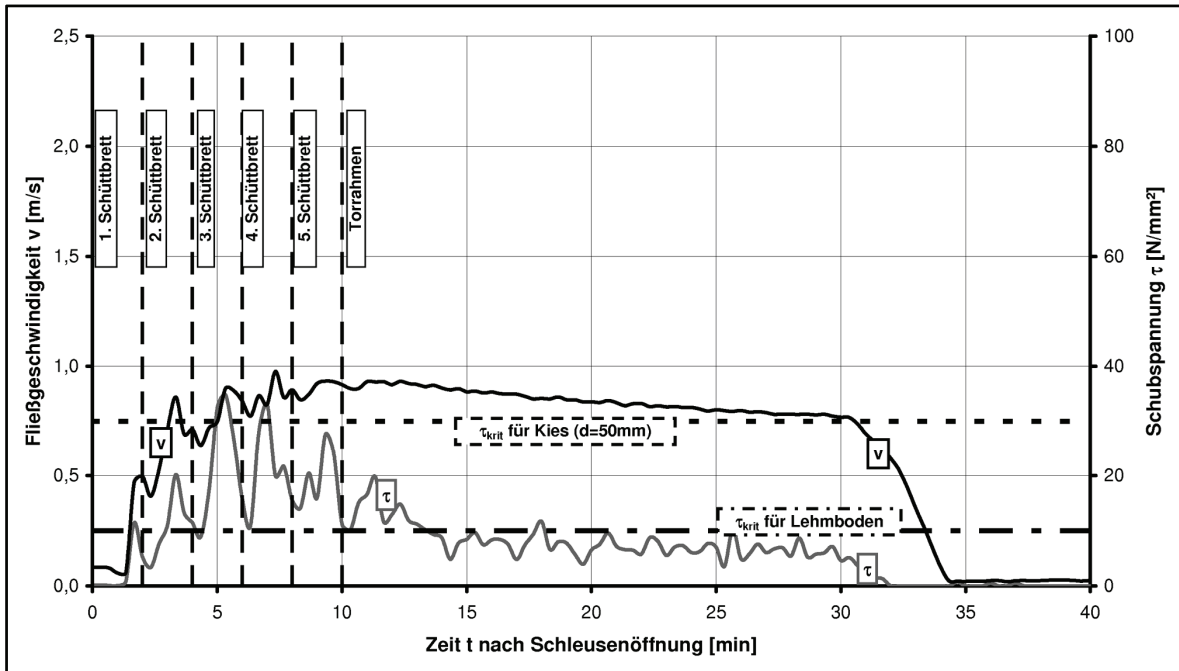


Abb. 33: Szenario 2 – Zeitlicher Verlauf der Fließgeschwindigkeit und der Sohlschubspannung nach der Schleusenöffnung 10 m unterhalb der Zienburger Stauschleuse.

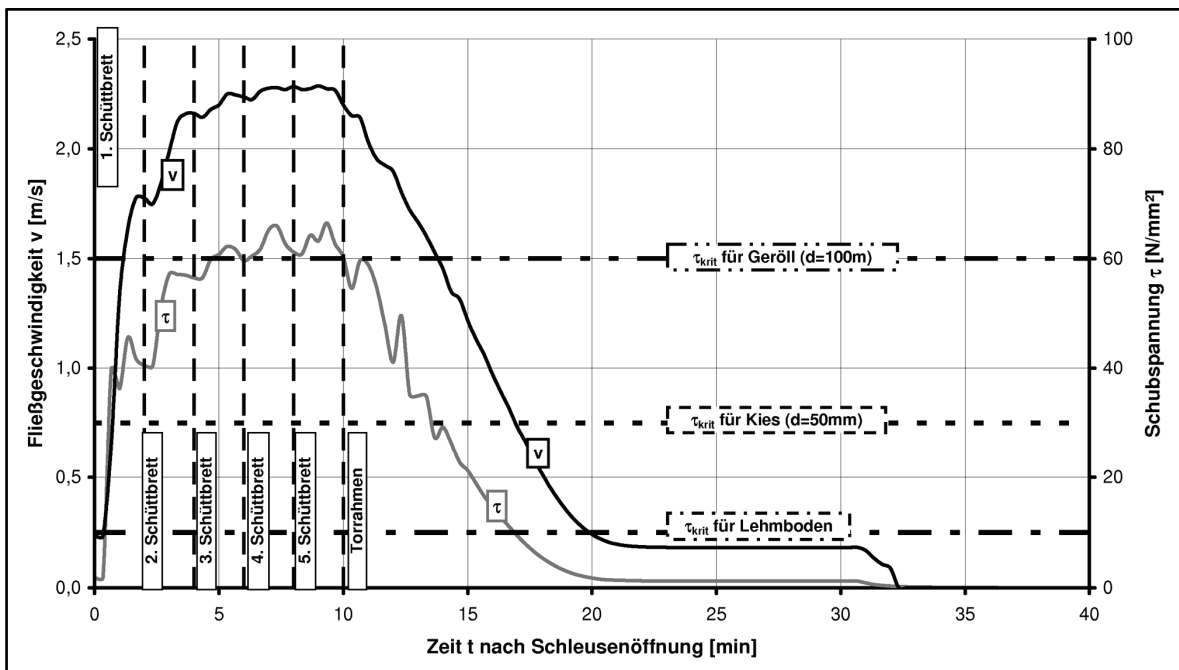


Abb. 34: Szenario 2 – Zeitlicher Verlauf der Fließgeschwindigkeit und der Sohlschubspannung nach der Schleusenöffnung 10 m unterhalb der unteren Hahnenburger Stauschleuse.

8.2.3 Schlussfolgerungen (Szenario 2)

Eine Schifffahrt unter den angenommenen Randbedingungen scheint an der Zienburger Schleuse möglich gewesen zu sein, wenn die Schleuse länger (als in der Simulation) geöffnet gewesen wäre und die bergfahrenden Schiffe somit genügend Zeit gehabt hätten, den kritischen Kanalabschnitt zu passieren. Aus hydrologischer Sicht wäre dann allerdings (wie in Abs. 8.2.2b ausgeführt) eine ausgeglichene Wasserbilanz zumindest stark in Frage zu stellen.

Es sei allerdings ausdrücklich darauf hingewiesen, dass ein Betrieb mit Wasser sparenden Kammerschleusen an der Möllner Seite und einer Stauschleuse bei Zienburg aus hydrologischer und hydraulischer Sicht für denkbar gehalten wird.

Am Standort der Hahnenburger Schleusentreppe ist dagegen ein Betrieb mit zwei Stauschleusen auszuschließen, weil:

- die untere Stauschleuse nicht schnell genug hätte geöffnet werden können. Das oberwasserseitig gespeicherte Wasservolumen wäre abgelaufen gewesen, bevor alle Schützbretter gezogen worden wären, der Schleusenbaum aus dem Querschnitt gedreht worden wäre und die talfahrenden Schiffe die Schleuse hätten passieren können.

- in Abhängigkeit vom Abstand der beiden Stauschleusen untereinander die Torhöhe der unteren Schleuse zu groß geworden wäre. Die Toroberkante der unteren Stauschleuse musste mindestens dem Stauziel der Scheitelhaltung entsprechen, da die Tore der oberen Stauschleuse aufgrund des großen Energieliniengefälles sonst nicht hätten geschlossen werden können. Dieses ist aus konstruktiven und betrieblichen Gesichtspunkten begrenzt.

- das Zeitfenster für die Bergschleusung sehr gering gewesen wäre. Hier wären lediglich 10 Minuten geblieben, um den kritischen Kanalabschnitt mit einer Länge von 190 m zu überwinden. Hierfür wären wenigstens fünf Personen erforderlich gewesen, um das Schiff hinauf zu ziehen. Außerdem hätte hierbei den talfahrenden Schiffen Platz gelassen werden müssen.

- die Haltung oberhalb der unteren Stauschleuse nach deren Öffnung trocken gefallen wäre. Hier hätte für die bergfahrenden Schiffe ein Vorhafen existiert haben müssen, um auf die Weiterfahrt zu warten. Ohnehin hätte diese zwei Tage auf sich warten gelassen, bis wiederum genügend Wasser in der Scheitelhaltung versammelt gewesen wäre.

- das Schließen der Tore der oberen Stauschleuse erst möglich gewesen wäre, wenn sich die Wasserspiegel ausreichend angeglichen hätten. Dieses wäre aufgrund des großen Sohlgefälles der unterwasserseitigen Haltung erst dann der Fall gewesen, wenn sich ein Rückstau vor der unteren Stauschleuse eingestellt hätte. De facto hätte diese Betriebsweise denen von Kammerschleusen entsprochen.

- die Sohl Schubspannungen nach dem Öffnen der Tore aufgrund des großen Energieliniengefälles sehr groß geworden wären. Die Sohlstabilität ist wenigstens in Frage zu stellen.

- es am Übergang des Kanalquerschnittes zum Möllner See zum Zeitpunkt, an dem die talfahrenden Schiffe diesen Abschnitt passiert hätten, zu einer Reflexion und Überlagerung der Schwallwellen gekommen wäre. Es bleibt offen, inwieweit die Prähme diesen Schifffahrtsbedingungen gewachsen gewesen wären.

- aus wasserwirtschaftlicher Sicht ein Betrieb der zu beiden Seiten mit Stauschleusen abgeschlossenen Scheitelhaltung aufgrund des großen Wasserverlustes beim Schleusungsvorgang nicht möglich gewesen wäre. Es sei denn, die Schleusungshäufigkeit wäre drastisch reduziert worden, wofür es keine Hinweise gibt.

Zur Variation der Stauschleusenabstände, bleibt Folgendes anzumerken: Ein größerer Abstand der beiden Stauschleusen zueinander (> 100 m) hätte zwangsläufig dazu geführt, dass die Tore der unteren Schleuse hätten höher werden müssen. Ein Abstand von 200 m hätte bereits eine Torhöhe von rund 4 m bedingt. Natürlich hätte dieses Tor einerseits dem hydrostatischen Druck standhalten müssen, andererseits ist zu bedenken, dass durch das Füllen der Haltung eine Schwall-

welle mit der Höhe von etwa 1 m „gegen das Tor“ gelaufen wäre. Hieraus resultiert eine zusätzliche dynamische Belastung des Tores, und es ist in Frage zu stellen, ob die Baumeister des 14. Jahrhunderts in der Lage waren, Schleusentore zu konstruieren, die diesen Anforderungen gerecht wurden.

Im Weiteren würde ein vergrößerter Abstand der Schleusen zur Folge gehabt haben, dass die zuvor erläuterten Schwallwellen beim Öffnen der unteren Stauschleuse aufgrund der größeren Wasserspiegeldifferenz an Höhe zugenommen hätten. Damit allerdings auch die Fließgeschwindigkeit und die aufzubringende Zugkraft, um die Schiffe „bergauf“ zu treideln.

Ein kleinerer Abstand der beiden Stauschleusen (< 100 m) hätte zwar die Belastung der Tore der unteren Stauschleuse reduziert. Allerdings wäre das in dieser Kanalhaltung gespeicherte Wasservolumen mit einiger Sicherheit nicht ausreichend gewesen, um im unterwasserseitig gelegenen Abschnitt bis zum Möllner See eine für die erforderliche Dauer der Schiffspassage ausreichende Wassertiefe bereitzustellen.

Aus hydrologischer Sicht war auf wenigstens einer Seite der Scheitelhaltung eine Kammer Schleuse erforderlich, um den Wasserverlust durch die Schleusungen zu reduzieren. Eine solche bietet sich natürlich auf der Seite der Hahnenburger Schleusentreppe an. Unter hydraulischen Aspekten hätte aber eine Kammer Schleuse an diesem Standort nicht ausgereicht. Es konnte gezeigt werden, dass hiermit die Tal-, vor allem aber die Bergfahrt nicht möglich gewesen wäre. Aus demselben Grund ist eine Variante mit einer oben liegenden Kammer Schleuse und einer tiefer liegenden Stauschleuse auszuschließen. Demnach sind für den Standort an der Hahnenburger Schleusentreppe bereits zu Beginn der Stecknitzfahrt um 1398 zwei Kammer Schleusen zwingend erforderlich gewesen. Ob hier tatsächlich jeweils zwei Tore in einem Bauwerk zu einer Kammer Schleuse zusammengefasst worden sind oder ob jeweils zwei dicht hintereinander liegende Stauschleusen die Funktion einer

Kammerschleuse übernahmen, ist heute nicht mehr eindeutig zu beantworten.

9. Einordnung der Untersuchungsergebnisse in den historischen Kontext

Oft wurde vermutet, dass an der Stecknitzfahrt im Bereich des Möllner Sees die ersten Kammer Schleusen Europas Anwendung fanden.¹³⁹ Meist beruhten diese Vermutungen auf der theoretischen Überlegung, dass das Überwinden des vorhandenen Geländesprunges am Standort der Hahnenburger Schleusentreppe nicht ohne Kammer Schleusen funktioniert haben kann. Auch wird häufig damit argumentiert, dass unter hydrologischen Aspekten kein dauerhafter Schifffahrtsbetrieb mit Stauschleusen möglich gewesen sei. Es gibt allerdings bisher weder physikalisch-hydraulisch handfeste Argumente, die dafür sprachen, noch sind historische Dokumente (z. B. Vertragsurkunden, Berichte o. ä.) über den Bau eben solcher Kammer Schleusen bekannt.

Rehder vermerkt hierzu:

„Die genannten Schleusen [die beiden Hahnenburger Schleusen] waren also bereits 1480 als eine Art Kammer Schleuse[n] ausgebildet; und es kann nach den örtlichen Verhältnissen mit Grund angenommen werden, dass der Kanal mit dieser Schleuseneinrichtung schon gleich bei der ersten Anlage versehen wurde.“¹⁴⁰

Hierbei bezieht sich Rehder auf eine „*Nachricht über die Schleusen vom Jahre 1480*“. Leider lässt er offen, auf welche Quelle genau er sich bezogen hat. Eckholt bezeichnet die beiden Hahnenburger Schleusen gar als die ältesten Kammer Schleusen der Welt.¹⁴¹ Allerdings ist diese These weder archäologisch noch durch schriftliche Quellen belegt.¹⁴² Schließlich führt Needham aus, dass es bereits im 10. Jahrhundert in China Kammer Schleu-

¹³⁹ Eckholt 1949, 255; Eckholt 1998, 14; Uhlemann 2002, 86.

¹⁴⁰ Rehder 1890, 575.

¹⁴¹ Eckholt 1980, 61 und 94.

¹⁴² Müller 2002, 17.

sen gegeben habe, dieses Wissen allerdings verloren ging und somit eine eigenständige europäische Entwicklung der Kammerschleuse stattgefunden haben müsste.¹⁴³ Des Weiteren führt Uhlemann an, dass Wreden bereits im Jahr 1919 den hydrologischen und hydraulischen Beweis für die Notwendigkeit zweier Kammerschleusen erbracht hätte.¹⁴⁴

Tatsächlich führt Wreden aus, dass die ersten Hahnenburger Schleusen von 1398 „mit einiger Sicherheit“ Kisten- bzw. Kammerschleusen gewesen sein dürften. Diese Aussage bezieht sich allerdings hauptsächlich auf die Auswertung historischer Quellen und der Feststellung, dass am betrachteten Standort aufgrund des „nicht ersetzbaren Wasserverbrauchs beim Durchschleusen“¹⁴⁵ Kammerschleusen existiert haben müssen. Einen hydraulischen oder hydrologischen Nachweis führt er nicht.

Aufgrund der großen Höhendifferenz liegt die Vermutung nahe, dass an diesem Standort schon bei Inbetriebnahme zwei Kammerschleusen existiert haben müssen. Hierbei wird stets strikt zwischen der Möglichkeit von Stau- oder Kammerschleuse unterschieden. Denkbar ist, wie bereits 1992 von Müller ausgeführt, dass sich der Anfang der Kammerschleuse als Weiterentwicklung zweier dicht beieinander liegender Stauschleusen ergeben hat.¹⁴⁶ Schließlich lag unterhalb der Hahnenburger Schleusen der Möllner See, welcher stets genügend Wasser hatte, so dass es keine Schwallwelle zur Erzielung der Schiffbarkeit auf demselben bedurft hätte. So ist möglicherweise die Entstehung der Kammerschleuse nicht als „plötzliche Erfindung“ zu sehen, sondern als Entwicklung aus der Notwendigkeit heraus, eine Vielzahl von Stauschleusen auf kurzer Strecke zu benötigen.

Uhlemann sieht die Entwicklung der Kammerschleuse in mehreren europäischen Ländern (Niederlande, Italien und Deutschland)

zeitgleich als eine Weiterentwicklung der bis dahin gut bekannten Stauschleusen.¹⁴⁷ Auch Eckholt sieht diese unterschiedlichen Ursprünge der Kammerschleuse. Während in den Niederlanden die Entwicklung der Kammerschleuse mit der Erfindung der Stemmtore aus der Notwendigkeit zur Schaffung eines sturmflutsicheren Verschlusses der Seedeiche einhergeht (die Theorie besagt, dass in den Seedeichen aus Sicherheitsgründen zwei Stemmtorpaare hintereinander angeordnet worden sind), war in Italien und Deutschland zweifellos zunächst die Überwindung von Mühlenwehren in schiffbaren Wasserwegen die treibende Kraft.¹⁴⁸ Ein weiterer Unterschied besteht darin, dass in den Niederlanden die Schleusen neben dem Sturmflutschutz in der Regel zur Schiffbarmachung künstlicher Entwässerungskanäle verwendet wurden, während in Deutschland und Italien zunächst eine Stauregulierung natürlicher Fließgewässer erfolgte. Der Gegensatz besteht vor allem darin, dass die niederländischen Entwässerungskanäle naturgemäß ein sehr geringes Sohlgefälle aufwiesen und die Wehre somit in erster Linie der Erhöhung des Wasserspiegels gedient haben dürften. Ziel wäre die Erreichung eines schiffbaren Wasserstandes gewesen. Die deutschen und italienischen Schleusen hingegen hatten vordergründig aus topografischen Aspekten grundlegend unterschiedliche Grundbedingungen. Hier mussten die Schleusen die Anpassung eines (künstlichen) Gewässerverlaufs an das Gelände und möglicherweise die Überwindung von Mühlenstauen ermöglichen. Der Übergang dicht beieinander liegender Stauschleusen zur Kammerschleuse mit zwei in einem Bauwerk vereinten Toren scheint dabei fließend.¹⁴⁹

Uhlemann sieht die bereits vor 1390 zur Schifffahrt stauregulierte Stecknitz als Vorgänger für die Entstehung der Hahnenburger Kammerschleusen. Schließlich musste an den Ober- und Donnerschleusen jeweils ein beachtlicher Höhenunterschied auf einer kurzen

¹⁴³ Needham 1963, 91 und Uhlemann 2000, 18.

¹⁴⁴ Uhlemann 2000, 30 und Wreden 1919, 21 f.; 30 ff.

¹⁴⁵ Wreden 1919, 30.

¹⁴⁶ Müller 1992, 8.

¹⁴⁷ Uhlemann 1999, 7.

¹⁴⁸ Eckholt 1949.

¹⁴⁹ Wreden 1919, 32; Eckholt 1998, 14.

Strecke überwunden werden. Aus diesem Grund seien an diesen Standorten schon vor 1390 jeweils zwei Stauschleusen eingerichtet gewesen.¹⁵⁰

Wreden geht davon aus, dass die Hahnenburger Schleusen bereits seit 1398 „mit einiger Sicherheit“ Kammerschleusen gewesen sind und zwar aus dem Grund, den nicht ersetzbaren Wasserverbrauch beim Durchschleusen mit einer Stauschleuse zu verhindern.¹⁵¹ Interessanterweise bezeichnet Wreden die beiden 1448 erstmals erwähnten Hahnenburger Schleusen als Kistenschleusen. Hiermit ist gemeint, dass diese in Form eines hölzernen Kastens frei standen und deren Seitenwände nicht mit Boden hinterfüllt waren. Verschiedene historische Verfasser hätten übereinstimmend berichtet, dass diese 1448 erwähnte Schleusenanlage ihre ursprüngliche Form beibehalten hätte, so dass sie bereits bei Inbetriebnahme der Stecknitzfahrt 1398 als Kistenschleuse (oder: Kammerschleuse) existiert haben muss.¹⁵² Rohde geht davon aus, dass im Bereich der Hahnenburger Schleusentreppe zunächst vier einzelne Stauschleusen existiert hätten, wodurch de facto die Funktion einer Kammerschleuse erreicht worden sei.¹⁵³ Diese Theorie wird durch vorliegende Arbeit gestützt.

Die erste eindeutige Beschreibung einer Kammerschleuse in Europa lässt auf die Entwicklung aus der Stauschleuse schließen. Alberti schreibt im Jahr 1452 an Papst Nikolaus V.:

„Mach die Sperren doppelt, indem du den Fluß an zwei Stellen einschneidest und einen Zwischenraum läßt, der die Länge eines Schiffes faßt, so daß, wenn ein berganfahrendes Schiff hier landet, die untere Sperre geschlos-

*sen, die obere geöffnet werden muß; ist aber ein zu Tal fahrendes Schiff, dagegen die obere geschlossen und die untere geöffnet werden muß. Das Schiff wird auf diese Weise, wenn dieser Teil des Wassers abgelassen ist, mit dem Flusse bergab geleitet. Das übrig bleibende Wasser wird die obere Sperre aufspeichern.“*¹⁵⁴

Nachweislich wurde 1439 in Italien die Muschelschleuse zu Viarena ausgeführt, welche nach dem Prinzip der Kammerschleuse funktionierte. Allerdings bestand hier der obere Dremmel aus einem natürlichen Wasserfall. Dieser Typ einer sog. Muschelschleuse (ital.: *conca*) wird bereits 1420 von Decembrio¹⁵⁵ erwähnt und fand im mittelalterlichen Italien weite Verbreitung. Für die Existenz der von Decembrio genannten Schleuse fehlen allerdings Belege. Hierbei handelt es sich ausschließlich um eine theoretische Beschreibung der Muschelschleuse.

In den Niederlanden erfolgte offenbar der erste Bau einer Kammerschleuse an der Mündung des Utrecht-Kanals in den Lek im Jahr 1373 in Vreeswijk.¹⁵⁶ In Gouda wird eine Kammerschleuse aus dem Jahr 1413 angeführt. Aufgrund nicht eindeutiger Begriffsbestimmungen (in den Niederlanden wurde für Stauwerke, Wehre und Schleusen unterschiedliche und sich vermischende Begriffe verwenden) sind diese Angaben nach Wreden allerdings nicht gesichert.¹⁵⁷

In diesem Zusammenhang wird von ihm passenderweise die Entwicklung der Kammerschleuse als „ein empirisch gewonnener Grad der Idee des Problems, Schiffe gefahrlos und bequem zu schleusen“ bezeichnet. Von einer

¹⁵⁰ Uhlemann 2002, 88.

¹⁵¹ Wreden 1919, 21 f.

¹⁵² Wreden 1919 bezieht sich hierbei auf Bellidor 1737/51, Hogrewe 1780, Woltmann 1826 und Rehder 1890. Da sich hierunter kein zeitgenössischer Bericht befindet, muss in Betracht gezogen werden, dass alle vier Schreiber sich auf eine gemeinsame Quelle beziehen, die leider unbekannt ist.

¹⁵³ Rohde 1998, 348.

¹⁵⁴ Leone Battista Alberti: *De re aedificatoria*. 10. Buch, 12. Abs. (1452), Zitat entnommen aus Uhlemann 1999, 7 f. Übersetzung nach M. Theuer; vgl. hierzu auch: Eckholt 1949, 255; Hagen 1852, 6; Wreden 1919, 29 und Uhlemann 2002, 94.

¹⁵⁵ Wreden 1919, 27 und 32.

¹⁵⁶ ICOMOS, TICCIH 1996, 11.

¹⁵⁷ Wreden 1919, 16 f. – Hier geht der Autor ausführlich auf die etymologische Herkunft der unterschiedlichen, niederländischen Begriffe für die Wehr- und Schleusenformen ein.

„Erfindung“ im eigentlichen Sinne könne keine Rede sein.¹⁵⁸

Lange Zeit vor der europäischen Entwicklung gab es bereits im 10. Jahrhundert in China Kammerschleusen. Needham verweist auf die *Sung-Shih*, welche eine recht explizite Beschreibung einer Kammerschleuse am Pien-Kanal (einem Vorläufer des Kaiserkanals oder Großen Kanals) enthält, die im Jahr 984 gebaut worden sei:

„Chhiao Wie-Yo baute auch fünf Rollbrücken^[159] zwischen An-Peih und Huai-shih. Jeder hatte zehn Gassen zum Hinunter- und Hinaufgehen der Kähne. [...] Chhiao Wie-Yo befahl deshalb den Bau von zwei Toren am dritten Damm des westlichen Fluss. Die Entfernung zwischen beiden Toren betrug etwas mehr als 50 Schritte und der gesamte Raum wurde mit einem großen Dach wie ein Schuppen überdeckt. Die Tore waren hängende Tore; (wenn sie geschlossen waren) sammelte sich das Wasser wie bei den Gezeiten an, bis die erforderliche Höhe erreicht war, und dann, wenn die Zeit gekommen war, wurde ihm erlaubt, herauszufließen.“¹⁶⁰

Das chinesische Wissen um die Kammerschleuse ging offenbar im späteren Mittelalter verloren, so dass von einer eigenständigen europäischen Entwicklung ausgegangen werden muss. Vielmehr erlernten die Chinesen später von den Europäern erneut die Funktionsweise der Kammerschleuse.

Mit vorliegender Untersuchung konnte nachgewiesen werden, dass bereits bei der Eröff-

nung der Stecknitzfahrt im Jahr 1398 unter Berücksichtigung hydrologischer, hydraulischer, konstruktiver und betrieblicher Aspekte zwingend zwei Kammerschleusen oder vier paarweise miteinander gekoppelter Stauschleusen mit der Funktion von Kammerschleusen vorhanden gewesen sein müssen. Diese sind unter die ersten nachgewiesenen Kammerschleusen Europas einzuordnen.

Literatur

Abert, B.; Hidalgo, J.; Keilholz, P. 2007, *Untersuchungen zur Konstruktion und Wasserwirtschaft der Dückerschleuse in der historischen Stecknitzfahrt*, Unveröffentlichte Projektarbeit der Fachhochschule Lübeck.

Bähr, A. 2001, *Wasserwirtschaft des Elbe-Lübeck-Kanals*, Unveröffentlichte Diplomarbeit der Fachhochschule Lübeck.

Behrens, H.L. 1818, *Topographie des Stecknitzkanals und Darstellung eines Projectes zu einer besseren Einrichtung desselben*, Hamburg.

Bellidor, *Architectura Hydraulica*, Paris 1737/51, Augsburg 1766/71.

Bohart, W.; Bornefeld, C.; Lopau, C. 1998, *Die Geschichte der Stecknitz-Fahrt: 1398–1998*, Schwarzenbek.

Eckholt, M. 1949, Die Entwicklung der Kammerschleuse, *Wasserwirtschaft*, Jg. 1949, Heft 9, S. 255-260 und Heft 10, S. 290-295.

Eckholt, M. 1980, *Schiffahrt auf den kleinen Flüssen Mitteleuropas in der Römerzeit und Mittelalter*. In: *Schriften des Deutschen Schifffahrtsmuseums* Band 14.

Eckholt, M. (Hg.) 1998, *Flüsse und Kanäle – Die Geschichte der deutschen Wasserstraßen*. 1. Auflage, Hamburg.

FFH (Freie und Hansestadt Hamburg); Hamburg Port Authority (Hg.) 2004, *Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch 2003 – Elbegebiet, Teil III*, Hamburg.

Goldammer, G. 2000, *Die Relikte der Stecknitzfahrt*, in: *Happach-Kasan* 2000, S. 81-100.

Hagen, G.H.L. 1852, *Handbuch der Wasserbaukunst – 2. Teil: Die Ströme*. Bd. 3, Berlin.

Happach-Kasan, Chr. (Hg.) 2002, *Die Stecknitzfahrt*, 3. Auflage, Ratzeburg.

Heinemann; Fedhaus 2003, *Hydraulik für Bauingenieure*. 2. Auflage, Wiesbaden.

¹⁵⁸ Wreden 1919, 32.

¹⁵⁹ In der engl. Übersetzung heißt es „five double slipways“ mit dem Hinweis, dass es sich um einen Damm (= chin.: *yen*) gehandelt habe. Eine doppelte Helling (= engl.: *double slipway*) ist nach Auffassung des Autors eine Rollbrücke. So kann auch die chinesische Übersetzung als Damm, der quer zur Fließrichtung eingebaut ist, interpretiert werden.

¹⁶⁰ Zitat in Anlehnung an die deutsche Fassung von Uhlemann 2002, 84. Hierin Übersetzung aus dem Englischen nach Needham 1963, 91. Chinesischer Originaltext aus der *Sung-Shih* (Geschichte der Sung-Dynastie) von 1345, dort: Abs. 307, S. 1b ff. und Abs. 96, S. 1b.

- Hogrewe**, J.L. 1780, *Beschreibung der in England seit 1759. angelegten und jetzt grösstentheils vollendeten schiffbaren Kanäle, zur inneren Gemeinschaft der vornehmsten Handelsstädte. Nebst einem Versuch einer Geschichte der inländischen Schifffahrt, und aller, bis jetzt, in= und ausserhalb Europa bekannten schiffbaren Kanäle*, Hannover.
- Hogrewe**, J.L. 1805, *Praktische Anweisung zur Baukunst schiffbarer Kanäle*, Hannover.
- ICOMOS; TICCIH** 1996, (International Council of Monuments and Sites; The International Committee for the Conservation of the Industrial Heritage), *The International Canal Monuments List*, Paris. Online abrufbar unter: <http://www.icomos.org/studies/canals.pdf> (Stand: 06.06.2009).
- Jirka**, G. 2007, *Einführung in die Hydromechanik*. 3. Auflage, Karlsruhe. Online abrufbar unter: http://www.uvka.de/univerlag/volltexte/2007/269/pdf/Lehrbuch_Hydromechanik_Jirka.pdf (Stand: 13.09.2008).
- LANU (2002)**: Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein: *Merkblatt M-2 – Hinweise zur Bewertung hydraulischer Begrenzungen in Fließgewässern bei der Einleitung von Regenwasser aus Trennkanalisationen*, Juli 2002
- Müller**, W. 2002, *Die Stecknitzfahrt*, in: Happach-Kasan, Chr. 2002, S. 7-68.
- Müller**, W. 1992, *Moderne Binnenschifffahrt auf historischen Wegen: Die Stecknitzfahrt*. In: Müller, W.; Happach-Kasan, Chr., 1992, S. 5 bis 17 .
- Müller**, W.; **Happach-Kasan**, Chr. (Hg.) 1992, *Der Elbe-Lübeck-Kanal – die nasse Salzstraße*, Neumünster.
- Needham**, J. 1963, China and the invention of the pound-lock, *Transactions of the Newcomen Society of the study of History of Engeneering*, Vol. 36, pp. 85-107, London.
- Rehder**, P. 1890, *Die Gewässer im ganzen Umfang des Niederschlagsgebietes der Trave unter besonderer Berücksichtigung der schifffahrtlichen Verhältnisse. Band 2 der Lübecker Landeskunde*, Lübeck.
- Rehder**, P. 1892, *Entwürfe zu einem Elbe-Trave-Kanal* (Einzusehen beim Wasser- und Schifffahrtsamt Lauenburg).
- Rohde**, Hans (1998): *Die Stecknitzfahrt*, in: Eckholt 1998, S. 348-351.
- Rössert** 1999, *Hydraulik im Bauwesen*. 10. Auflage, München.
- Schneider**, KJ 2002, *Bautabellen für Ingenieure*, 15. Auflage, Düsseldorf.
- Uhlemann**, H.-J., 1999, *Die Geschichte der Schiffshebewerke – Entstehung und Entwicklung der Wasserstraßen und Hebewerke*, 1. Auflage, Hamburg.
- Uhlemann**, H.-J., 2000, *Zwischen Elbe und Ostsee – Zur Entstehung der Schleswig-Holsteinischen und Mecklenburg-Vorpommerschen Wasserstraßen*, 1. Auflage, Hamburg.
- Uhlemann**, H.-J., 2002, *Schleusen und Wehre – Technik und Geschichte*. 1. Auflage, Hamburg.
- Woltmann**, R. 1826, *Beyträge zur Schiffbarmachung der Flüsse – Kap. II: Bericht über die Stecknitzfahrt*, Hamburg.
- Wreden**, R. 1919, *Vorläufer und Entstehen der Kammerschleuse*. Berlin.

