

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Report, Published Version

Dettmann, Thorsten; Metz, Christian; Zentgraf, Rolf-Dieter; Harlacher, Dennis

Optimierung der Befahrbarkeit von Flüssen. FuE-Abschlussbericht A39530410035

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105084>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

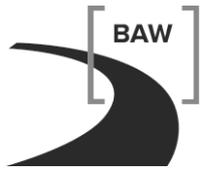
Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2014): Optimierung der Befahrbarkeit von Flüssen. FuE-Abschlussbericht A39530410035. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

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

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

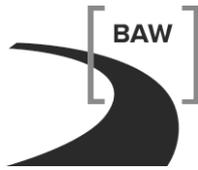
Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

**Forschungsbericht
zum
Forschungsvorhaben
"Optimierung
der Befahrbarkeit von Flüssen"**

A39530410035



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

**Forschungsbericht
zum
Forschungsvorhaben
"Optimierung
der Befahrbarkeit von Flüssen"**

Auftraggeber: Bundesanstalt für Wasserbau
Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe

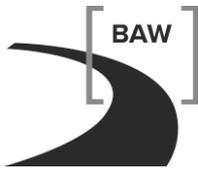
Auftrag vom: 02.01.1999, Az.:

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. A39530410035

Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Binnenbereich
Referat: W2 / FG SFS
Bearbeiter: Fahrdynamische Modellierung und Virtuelle
Navigation:
Th. Dettmann, Ch. Metz
Flussbauliche Modellierung:
R. Zentgraf, D. Harlacher

Karlsruhe, 30.11.2014

Der Bericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.



Zusammenfassung

Im Oktober 1998 wurde von den Referaten W1, Flussbau I, W2 Flussbau II und W4, Schiff, Wasserstraßen und Naturmessungen gemeinsam folgende Arbeitskonzeption für ein F+E Vorhaben formuliert: „Optimierung der Befahrbarkeit von Flüssen unter Beachtung hydrodynamischer, fahrdynamischer und morphodynamischer Kriterien am Beispiel einer Referenzstrecke auf dem Rhein“. Ziel ist es, eine Entscheidungshilfe zur Bewertung der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs und ein Optimierungsverfahren zur Ausführung von Unterhaltungsmaßnahmen an Flüssen zu entwickeln.

Durch das Verkehrsprojekt Deutsche Einheit (VDE17) konzentrierten sich fahrdynamische Untersuchungen auf die Ermittlung von Fahrspurbreiten in Kanälen. Diese lieferten, unterstützt durch Naturuntersuchungen, die Berechnungsgrundlagen für den Breitenanspruch von Schiffen in Kanälen mit Hilfe des cf Wertes.

Für den freifließenden Rhein zwischen Iffezheim und der holländischen Grenze wurde ein operatives hydraulisch-numerisches Modell entwickelt und betrieben. Dieses lieferte für unterschiedliche Abflusszustände notwendige Parameter um fahrdynamische Berechnungen zu entwickeln und durchzuführen. Damit konnten, analog zu den Kanälen, fahrdynamische Fragestellungen für Schiffe in fließenden Gewässern untersucht werden.

Die fahrdynamischen Berechnungen konzentrierten sich auf die Ermittlung der Trägheitskräfte, der Berechnung der Fliehkräfte sowie der Berechnung der Kräfte infolge der Schräganströmung. Über die Vorgabe einer Kursachse konnte mit Hilfe des taktischen Drehpunktes der Breitenbedarf von Schiffen in Fließgewässern bestimmt werden.

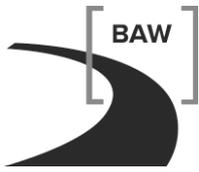
Im Rahmen einer virtuellen Navigation wurden Kursachsen benötigt. Hierfür wurde ein Verfahren zur Bewertung des Flusses entwickelt, das über Befahrbarkeitspotenziale nautisch günstige Bereiche ermittelt und so unter Einbeziehung fahrdynamischer Größen (Schiffslänge, -breite, -masse und -geschwindigkeit) die Konstruktion von Kursachsen ermöglicht.

Das Kapitel 6 beschreibt praktische Anwendungsbereiche der bisher entwickelten Verfahren.

Die eindimensionalen Betrachtungen zeigten in der Praxis deutlich einschränkende Annahmen. Der Schritt zur zweidimensionalen Betrachtung fahrdynamischer Eigenschaften konnte durch die Anschaffung eines Schiffsführungssimulators realisiert werden.

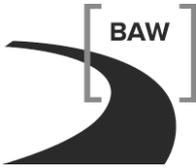
(1) Titel		
Forschungsbericht zur Optimierung der Befahrbarkeit von Flüssen		
(2) Unterzeichner	Th. Dettmann, R. Zentgraf	
(3) Bearbeiter	Fahrdynamische Modellierung und Virtuelle Navigation: Th. Dettmann, Ch. Metz Flussbauliche Modellierung: R. Zentgraf, D. Harlacher	
(4) Mitarbeiter	S. Stober, S. Schlenker-Bohr	
(5) Auftraggeber	Bundesanstalt für Wasserbau Kußmaulstraße 17 76187 Karlsruhe	(6) Auftrags-Nr. A39530410035
(7) erteilt am	02.01.1999	(8) begonnen am 01.02.1999
		(9) aufgestellt am 30.11.2014
(10) Ort	(11) Wasserstr.-Nr.	(12) Kilometer
Rhein	3900	von bis
		334 865
(13) Seitenzahl	79	(14) Anlagen 2
		(15) Sonderhinweise
(16) Literaturangaben		(17) Zusätzl. Angaben
(18) Kurzfassung		
<p>Im Oktober 1998 wurden von den Referaten W1, Flussbau I, W2 Flussbau II und W4, Schiff, Wasserstraßen und Naturmessungen gemeinsam folgende Arbeitskonzeption für ein F+E Vorhaben formuliert: „Optimierung der Befahrbarkeit von Flüssen unter Beachtung hydrodynamischer, fahrdynamischer und morphodynamischer Kriterien am Beispiel einer Referenzstrecke auf dem Rhein“. Ziel ist es, eine Entscheidungshilfe zur Bewertung der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs und ein Optimierungsverfahren zur Ausführung von Unterhaltungsmaßnahmen an Flüssen zu entwickeln.</p> <p>Durch das Verkehrsprojekt Deutsche Einheit (VDE17) konzentrierten sich fahrdynamische Untersuchungen auf die Ermittlung von Fahrspurbreiten in Kanälen. Diese lieferten, unterstützt durch Naturuntersuchungen, die Berechnungsgrundlagen für den Breitenbedarf von Schiffen. Für den freifließenden Rhein zwischen Iffezheim und der holländischen Grenze wurde ein operatives hydraulisch-numerisches Modell entwickelt und betrieben. Dieses lieferte für unterschiedliche Abflusszustände notwendige Parameter um fahrdynamische Berechnungen zu entwickeln und durchzuführen. Damit konnten, analog zu den Kanälen, fahrdynamische Fragestellungen für Schiffe in fließenden Gewässern untersucht werden.</p> <p>Die fahrdynamischen Berechnungen konzentrierten sich auf die Lösung der Bewegungsgleichungen eines Schiffes in der Ebene. Über die Vorgabe einer Kursachse konnte so der Breitenbedarf von Schiffen in Fließgewässern bestimmt werden. Mit Hilfe einer virtuellen Navigation wurden die notwendigen Kursachsen erzeugt. Das hier entwickelte Verfahren ermittelt mit Hilfe von Befahrbarkeitspotenzialen nautisch günstige Bereiche konstruiert unter Einbeziehung fahrdynamischer Größen (Schiffslänge, -breite, -masse und -geschwindigkeit) Kursachsen.</p> <p>Das Kapitel 6 beschreibt praktische Anwendungsbereiche der bisher entwickelten Verfahren. Die eindimensionalen Betrachtungen zeigten in der Praxis deutlich einschränkende Annahmen. Der Schritt zur zweidimensionalen Betrachtung fahrdynamischer Eigenschaften konnte durch die Anschaffung eines Schiffsführungssimulators realisiert werden.</p>		
(19) Schlagwörter		
(20) Standort	(21) Archiv-Nr.	(22) Mikrofilm-Nr.

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Optimierung der Befahrbarkeit von Flüssen	1
2	Veranlassung und Aufgabenstellung	2
3	Flussbauliche Modellierung	7
3.1	Hydrodynamisch-numerische Rheinmodelle von Iffezheim bis Lobith (Rh-km 336,210 - 865,500)	9
3.2	Modellinformationen und Datengrundlage	10
3.3	Ergebnisse der Modellrechnungen	10
3.4	OpDyMo – Operatives Dynamisches Modell	11
3.5	Profilgeometrien und Wasserspiegellagen - ProLag	15
3.6	Modellstruktur	16
3.7	Online-Pegelanbindung und erweiterter OpDyMo-Betrieb	18
4	Fahrdynamische Modellierung	22
4.1	Fahrdynamische 1D Modellierung	30
4.1.1	Ermittlung der Trägheitskräfte	30
4.1.2	Berechnung der Fliehkräfte	38
4.1.3	Berechnung der hydraulischen Kräfte infolge Schräganströmung	39
4.1.4	Berechnung der Position des taktischen Drehpunktes	41
4.2	Fahrdynamische 2D Modellierung	45
5	Virtuelle Navigation	46
5.1	Fahrdynamische Bewertung mit Befahrbarkeitspotenzialen	50
5.2	Generierung der Kursachsen	59
5.2.1	Bestimmung der Passagetore	60
5.2.2	Bestimmung des optimalen Passagetores	60
5.2.3	Routenoptimierung und Konstruktion der Kursachse	61
5.3	Zeitgesteuerte Navigation	66
6	Verknüpfung flussbaulicher Modelle mit dem fahrdynamischen Modell	72
6.1	Anwendungsbeispiel eindimensionaler Modellverfahren	73
6.2	Anwendungsbeispiel zweidimensionaler Modellverfahren	74
7	Bewertung der Ergebnisse und weiteres Vorgehen	76
8	Literaturverzeichnis	78



Bildverzeichnis	Seite
Bild 1: Berechnung der Fahrspurbreite nach Graewe	4
Bild 2: Gemessene Driftwinkel mit Bemessungsdriftwinkel	5
Bild 3: In Cf-Werte überführte Driftwinkel mit Bemessungswert	5
Bild 4: Vergleich berechnete Schleppekurve mit Luftaufnahme im Spreebogen in Berlin	6
Bild 5: 1D-HN-Einzelmodelle von Iffezheim (Rh-km 336,210) bis Lobith (Rh-km 865,500)	9
Bild 6: Teilmodell Mainz-Köln; Darstellung des Talwegs, der mittleren Sohlhöhe im Fahrrinnenbereich, der berechneten Wasserspiegellage, ausgewählte Fixierungen und der entsprechenden Richtpegelstände der Hochwassermarken I und II entlang des Modellgebiets	13
Bild 7: Teilmodell Mainz-Köln; Darstellung der minimalen, maximalen und mittleren Fließgeschwindigkeit und der entsprechenden Richtpegelstände entlang des Modellgebiets	14
Bild 8: Querprofilardarstellung (Rh-km 365,200) mit dem Programm ProLag	15
Bild 9: Darstellung der Querprofile im Lageplan mit dem Programm ProLag	15
Bild 10: Benutzeroberfläche des Programms ProLag	16
Bild 11: Auszug einer Modellstruktur Rh-km 375,600 – 386,800	17
Bild 12: Online-Simulation des Modells Speyer-Worms mit erfolgter Datenbankabfrage für den Zeitraum vom 01.03.2001 bis 06.04.2001, dargestellt ist der Wasserspiegelverlauf an drei verschiedenen Pegeln über den ausgewählten Zeitraum	18
Bild 13: Hydraulische Kennwerte einer instationären Berechnung vom 01.01.2006 des Teilmodells Mainz – Köln	19
Bild 14: Vergleich der minimalen Tiefen im reduzierten Fahrrinnenbereich unter GIW98* bzw. AZW98 mit den unter GIW02 freigegebenen Tiefen auf der Strecke Mainz bis Koblenz	20
Bild 15: Querprofilardarstellung der lokalisierten Engstelle im Fahrrinnenbereich bei Rhein-km 553,700	21
Bild 16: ECDIS-Karten bei Oberwesel und St. Goar (Betteck, Rh-km 553,700)	21
Bild 17: Definition der Koordinatensysteme zur Beschreibung der Schiffsbewegung	23
Bild 18: Definition des Kontrollraumes für die Beschreibung der Schiffsbewegung	24

Bild 19:	Darstellung der Hess-Smith-Panelmethode	32
Bild 20:	Definition des schiffsfesten Koordinatensystems	38
Bild 21:	Hydrodynamische Kräfte in der Kontrollebene dx	40
Bild 22:	Cf- Werte berechnet und gemessen für SV	44
Bild 23:	Cf-Werte gemessen und gerechnet für GMS	44
Bild 24:	Erster Trassierungsschritt: Konstruktion der Kursachsen	47
Bild 25:	Zweiter Schritt: Positionierung der Schiffssymbole	48
Bild 26:	Dritter Schritt: Generierung der Hüllkurven	49
Bild 27:	Definition eines Tiefenpotenzials im Flussprofil	50
Bild 28:	Befahrbarkeitspotenzial Bergfahrt am Beispiel Pfaffendorfer Brücke	52
Bild 29:	Befahrbarkeitspotenzial Talfahrt am Beispiel Pfaffendorfer Brücke	53
Bild 30:	Befahrbarkeitspotenzial für die Bergfahrt auf dem Rhein bei Hochwasser	54
Bild 31:	Befahrbarkeitspotenzial für die Talfahrt auf dem Rhein bei Hochwasser	54
Bild 32:	Profilpotenziale entlang des Rheins zwischen Rh-km 569 bis Rh-km 575	56
Bild 33:	Zusammenfassung aller Einzelpotenziale zu einem Gesamtbefahrbarkeitspotenzial	58
Bild 34:	Zusammenfassung aller Potenziale am Beispiel Rh-km 551,3	59
Bild 35:	Auswahl geeigneter Passagetore anhand der kürzesten Route	61
Bild 36:	Ermittlung eines Kreisbogens durch die Passagetore ohne Richtungswechsel	62
Bild 37:	Radien bei Vorzeichenänderung der Fahrtrichtung	64
Bild 38:	Ergebnisdarstellung von BoatSim	67
Bild 39:	Aufbau eines mehrstufigen Schiffspotenzialfeldes entlang der Ursprungskursachse	68
Bild 40:	Gerechnetes Überholmanöver	71
Bild 41:	Zusammenspiel alle vier Modellkomponenten	72
Bild 42:	fahrdynamische Berechnung von Fahrspuren bei verschiedenen Wasserständen (Bereich Mannheim)	73
Bild 43:	Tiefenverhältnisse bei GIW-2,10 m und GIW-2,30 m (Bereich Mannheim)	74
Bild 44:	Einfahrt eines GMS in den Schleusenkanal bei der Ausgangsvariante V00	75



Tabellenverzeichnis

Seite

Tabelle 1: Zusammenfassung zu 3 Teilmodellen von Iffezheim bis Lobith	10
Tabelle 2: Abflussspektrum der Teilmodelle	11
Tabelle 3: Zuflüsse im Modellgebiet	11

Anlagenverzeichnis

Anlage 1 Simulation von Schiffsbewegungen im Fließgewässer - Forschungsbericht Uni Rostock	
Anlage 2 EPA Bericht	

1 Optimierung der Befahrbarkeit von Flüssen

Im Oktober 1998 wurden von den Referaten W1, Flussbau I, W2 Flussbau II und W4, Schiff, Wasserstraßen und Naturmessungen gemeinsam folgende Arbeitskonzeption für ein F+E Vorhaben formuliert (Auszug aus /1/).

Optimierung der Befahrbarkeit von Flüssen

unter Beachtung hydrodynamischer, fahrdynamischer und morphodynamischer Kriterien am Beispiel einer Referenzstrecke auf dem Rhein

Arbeitskonzeption für ein F+E Vorhaben

Kurzbeschreibung

Aufbau eines Modells zur Bewertung der wasserstandsabhängigen Befahrung von Fließgewässern am Beispiel des Rheins von Rh-km 508 bis Rh-km 557. Auf der Grundlage eines instationären hydraulisch/numerischen Modells werden notwendige wasserstandsabhängige Parameter (z.B. Fahrwassertiefe, mittlere Fahrstreifengeschwindigkeiten, etc.) ermittelt. Diese dienen zur Ermittlung der abladebestimmenden Bereiche und als Eingangsdaten für ein Verfahren, mit welchem fahrdynamische Parameter (z.B. Schiffsgeschwindigkeiten, Driftwinkel und Raumbedarf, etc.) berechnet werden können. Im Ergebnis entstehen eine Entscheidungshilfe zur Bewertung der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs und ein Optimierungsverfahren zur Ausführung von Unterhaltungsmaßnahmen.

Problemdarstellung und Ziel

- Einschätzung der wasserstandsabhängigen Befahrbarkeit eines Fließgewässers mit unterschiedlichen Schiffstypen und -abmessungen
 - abladebestimmende Bereiche
 - Verkehrsflächenbedarf fahrender Schiffe (Berg- und Talfahrer)
- Entwicklung eines Analysewerkzeuges zur Abschätzung des streckenabhängigen Unterhaltungsaufwandes
- Ermittlung von Kriterien zur Feststellung der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs

Untersuchungsmethoden

- Aufbau eines instationären hydraulisch/numerischen Modells, mit welchem wasserstandsabhängig für jeden Abschnitt der Referenzstrecke hydrodynamische, fahrdynamische und morphodynamische Parameter gewonnen werden können. Mit diesem

Modell sollen variable Fließgeschwindigkeiten in Fahrrinnen ermittelt werden. Über orts- und zeitabhängige Wassertiefen werden abladebestimmende Bereiche festgestellt. Die zugehörigen Fließgeschwindigkeiten werden zur Berechnung des Fahrspurbedarfs benötigt.

- Auf der Grundlage mathematisch-physikalischer Ansätze, gestützt durch Naturuntersuchungen, wird ein fahrdynamisches Rechenmodell für Fließgewässer und Bemessungsschiffe unterschiedlicher Abmessungen entwickelt. Für die Referenzstrecke wird mit diesem Modell der Verkehrsflächenbedarf für Bergfahrer und Talfahrer berechnet. Als Eingangsdaten dienen die mit dem instationären hydraulisch/numerischen Modell berechneten örtlichen Fließgeschwindigkeiten sowie die geometrischen Daten des voraussichtlichen Kursweges.
- Durch eine Verknüpfung des instationären hydraulisch/numerischen Modells und des fahrdynamischen Modells werden die tauchtiefenbestimmenden Profile und die Position eines dort fahrenden Schiffes bestimmt. Unter Berücksichtigung der berechneten Position eines dort fahrenden Schiffes wird das dynamische Tauchungsverhalten des Schiffes (Squat) aus der Überlagerung von natürlicher Strömung und Schiffsumströmung abgeschätzt, und es wird bewertet, ob das Schiff unter Berücksichtigung seiner Abladung das Profil durchfahren kann.

2 Veranlassung und Aufgabenstellung

Zum Zeitraum der Planungsarbeiten für das Verkehrsprojekt Deutsche Einheit Nr. 17 (VDE 17), dem Ausbau der Wasserstraßen zwischen Hannover und Berlin zu einer Wasserstraße der Klasse Vb, galten in der Wasserstraßenverwaltung für die Projektierung von Kanälen bzw. von Fahrrinnen in nicht fließenden Gewässern „Richtlinien für Regelquerschnitte von Schifffahrtskanälen“ die mit dem BMV- Erlass BW24/BW23/BW28/52.05.00/16/VA94 im Jahr 1994 /2.1/ eingeführt wurden. Kurz nach Beginn der Planungsarbeiten stellte sich schnell heraus, dass sich die Ausbauziele dieser Richtlinien nicht durchsetzen ließen. Große Teile der auszubauenden Wasserstraße verlaufen durch natürliche Flusslandschaften in Naturschutz- bzw. FFH- Gebieten bzw. durch das Berliner Stadtgebiet, in dem die Bebauung bis an die derzeitigen Ufer heran reicht. Diese Randbedingungen erforderten es, dass die neuen Fahrrinnen im Wesentlichen dem vorhandenen Verlauf der Fahrrinne folgen mussten, wodurch die angestrebten Mindestradien von 600 m in Krümmungen nicht eingehalten werden konnten. Aus diesem Grund mussten mit Planungsbeginn des VDE 17 neue Trassierungswerkzeuge entwickelt werden.

In den genannten Richtlinien setzen sich die Fahrrinnenbreiten aus den Fahrspurbreiten der Bemessungsschiffe und den Sicherheitsabständen zwischen den Schiffen und zwischen Schiff und Ufer zusammen. Sowohl für die Sicherheitsabstände als auch für die Fahrspurbreiten der Schiffe wurden für die Geradeausfahrt feste Werte vorgegeben. Für Krümmun-

gen mit Radien unter 2000 m wurden die Fahrspurverbreiterungen nach der Formel von Graewe /2.2/ berechnet.

$$B1 = \sqrt{(R + b)^2 + \left[\frac{l}{2} + \left(R + \frac{b}{2} \right) * \tan(\beta) \right]^2} - R$$

Dabei sind:

B1 – Fahrspurbreite [m]

R – innerer Kurvenradius [m]

l – Schiffslänge [m]

b – Schiffsbreite [m]

β – Driftwinkel [grad]

Ergänzend zu dieser Rechenvorschrift wurden für den Radienbereich zwischen 600 m bis 2000 m Driftwinkel vorgegeben, die in die Formel einzusetzen waren.

Bedingt durch die Anforderungen der Planung des VDE 17 im Stadtgebiet Berlin, bei der die angestrebten Mindestradien von 600 m deutlich unterschritten werden mussten, wurde das Verfahren TRASSE entwickelt. Dieses Verfahren beruht im Grundsatz wie die Graewe-Formel auf dem Satz von Pythagoras. Wie in Bild 1 erkennbar, wird ein rechtwinkliges Dreieck aufgespannt, bei dem sich der rechte Winkel Außenbords an der Position des taktischen Drehpunktes befindet. Dies ist der Punkt am Schiffskörper, an dem die seitliche Anströmung auf den Schiffskörper die Richtung wechselt. Die spitzen Winkel liegen im Zentrum des Drehkreises bzw. im Heck des Schiffes. Bis auf die gesuchte Fahrspurbreite B1 folgen fast alle Parameter aus der Schiffs- und Kurvengeometrie. Der Driftwinkel, mit dessen Hilfe der Abstand zwischen Heck und der Position des taktischen Drehpunktes berechnet wird, wurde durch Naturmessungen bestimmt.

Diese Berechnung nach der Graewe-Formel lässt sich noch vereinfachen, in dem man einen dimensionslosen Koeffizienten Cf einführt, der multipliziert mit der Schiffslänge ebenfalls den Abstand zwischen Heck und Position des taktischen Drehpunktes ergibt /2.3/.

$$B1 = \sqrt{(R + b)^2 + [Cf * l]^2} - R$$

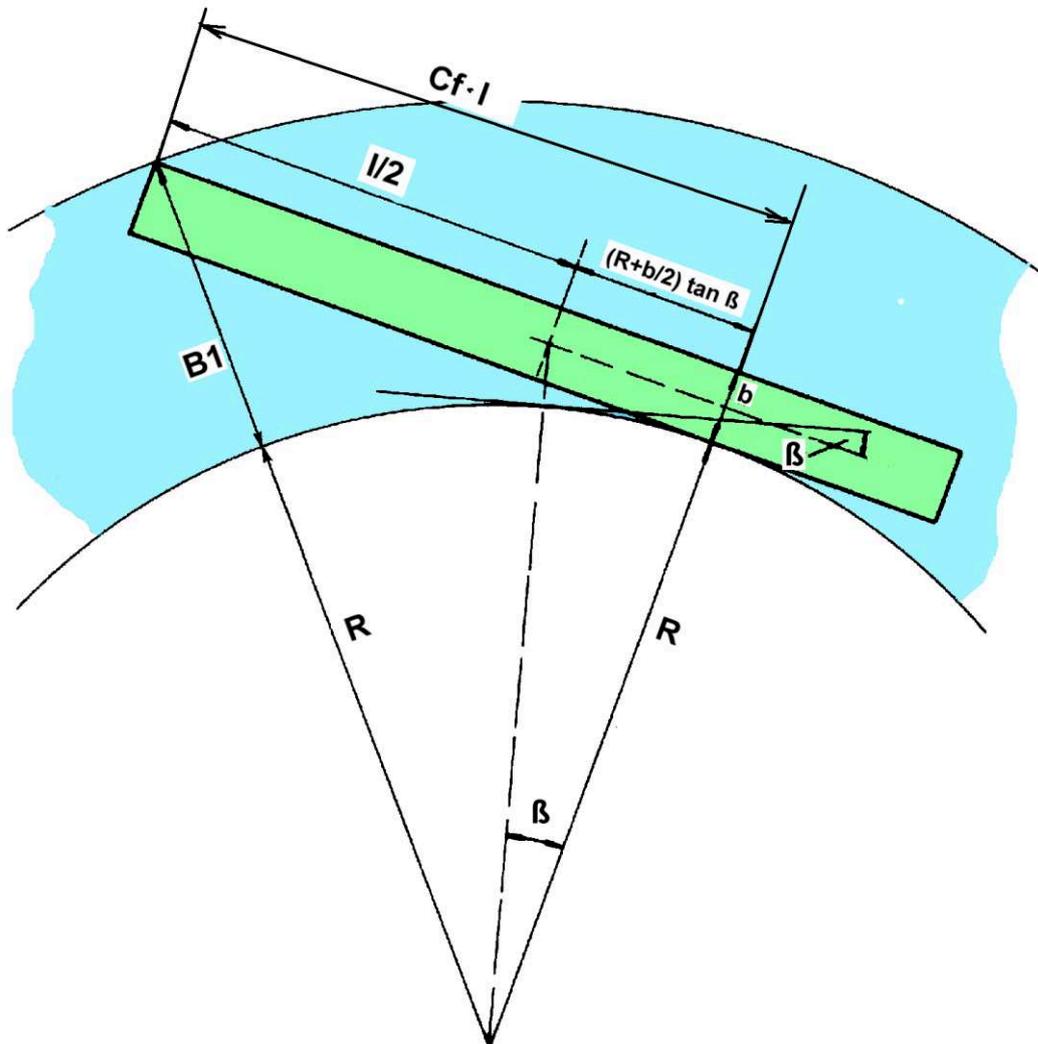


Bild 1: Berechnung der Fahrspurweite nach Graewe

Im Rahmen der Modellentwicklung und der Projektarbeiten rund um das VDE 17 wurde eine Vielzahl von fahrdynamischen Naturuntersuchungen durchgeführt, bei denen mit unterschiedlichen Schiffstypen und Beladungszuständen in Abhängigkeit der Kurvenradien die zugehörigen Driftwinkel gemessen wurden (Bild 2). Anschließend wurden die Driftwinkel in die dimensionslosen C_f -Werte überführt, wobei man feststellen konnte, dass der Koeffizient vom gefahrenen Radius unabhängig ist (Bild 3). Dies gilt bis zu einem kleinsten gefahrenen Radius von einer Schiffslänge.

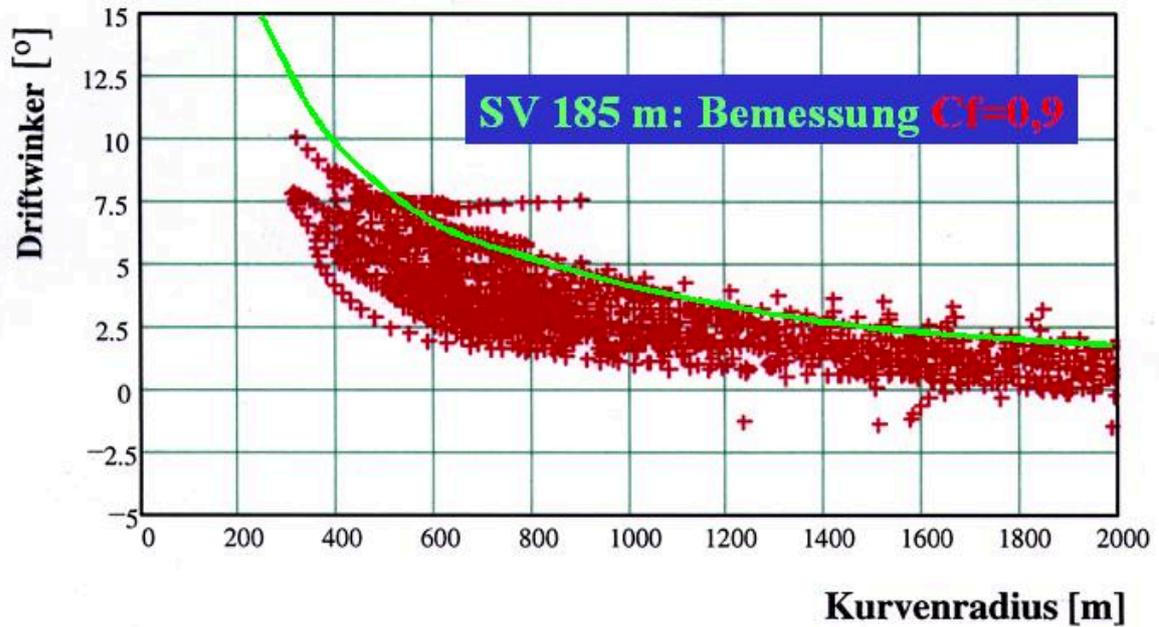


Bild 2: Gemessene Driftwinkel mit Bemessungsdriftwinkel

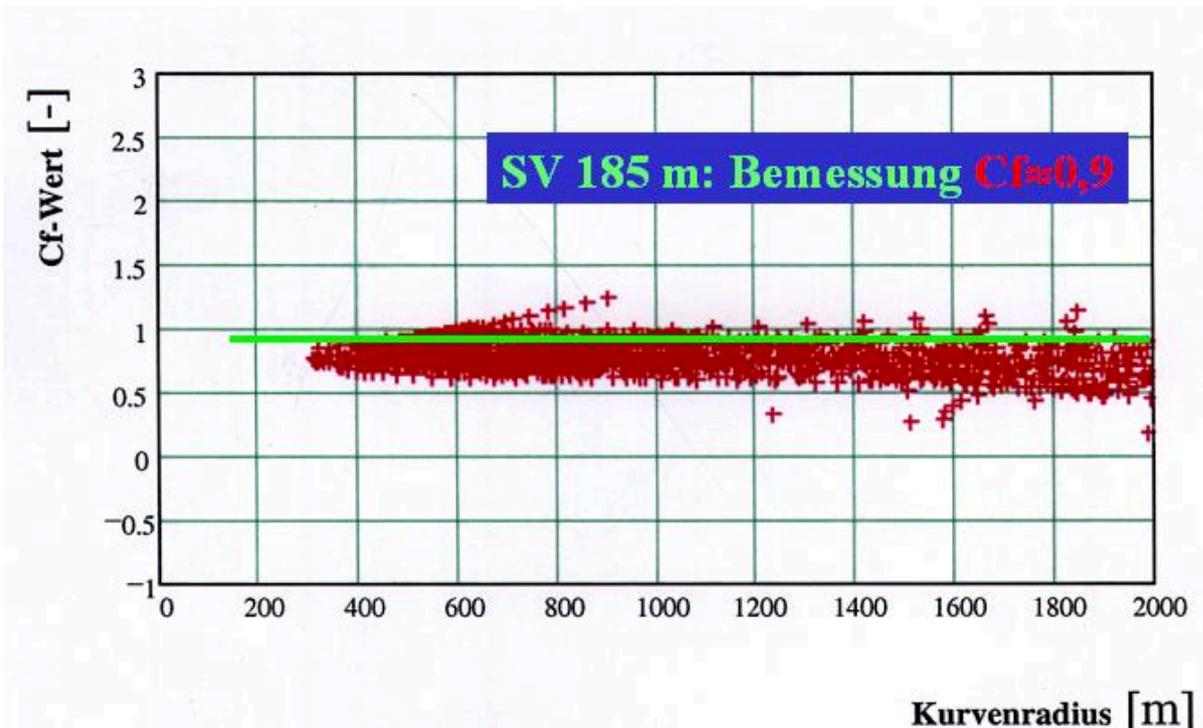


Bild 3: In Cf-Werte überführte Driftwinkel mit Bemessungswert

Mit beiden Berechnungsverfahren ließen sich nur pauschal Fahrspurbreiten für die Kurvenfahrt berechnen. Wie die Übergänge zwischen Gerade und Kreisbögen bzw. die Fahrspurbreiten in Kurven mit kleinen Zentriwinkeln zu gestalten waren, fehlten noch Informationen.

Bei der Weiterentwicklung des Verfahrens wurde die Tatsache genutzt, dass an der Position des taktischen Drehpunktes das Schiff mit seiner Mittschiffsachse immer tangential auf seiner Kursachse „fährt“. Führt man ein Rechtecksymbol, welches die Abmessungen des Bemessungsschiffes hat und dessen Referenzpunkt an der Position des taktischen Drehpunktes liegt, tangential an einer vorher konstruierten Kursachse entlang, entsteht aus der Vielzahl von Rechtecksymbolen eine Schleppkurve, die der Fahrspur eines Schiffes entspricht. Naturuntersuchungen haben die Richtigkeit dieser Vorgehensweise bestätigt (Bild 4).

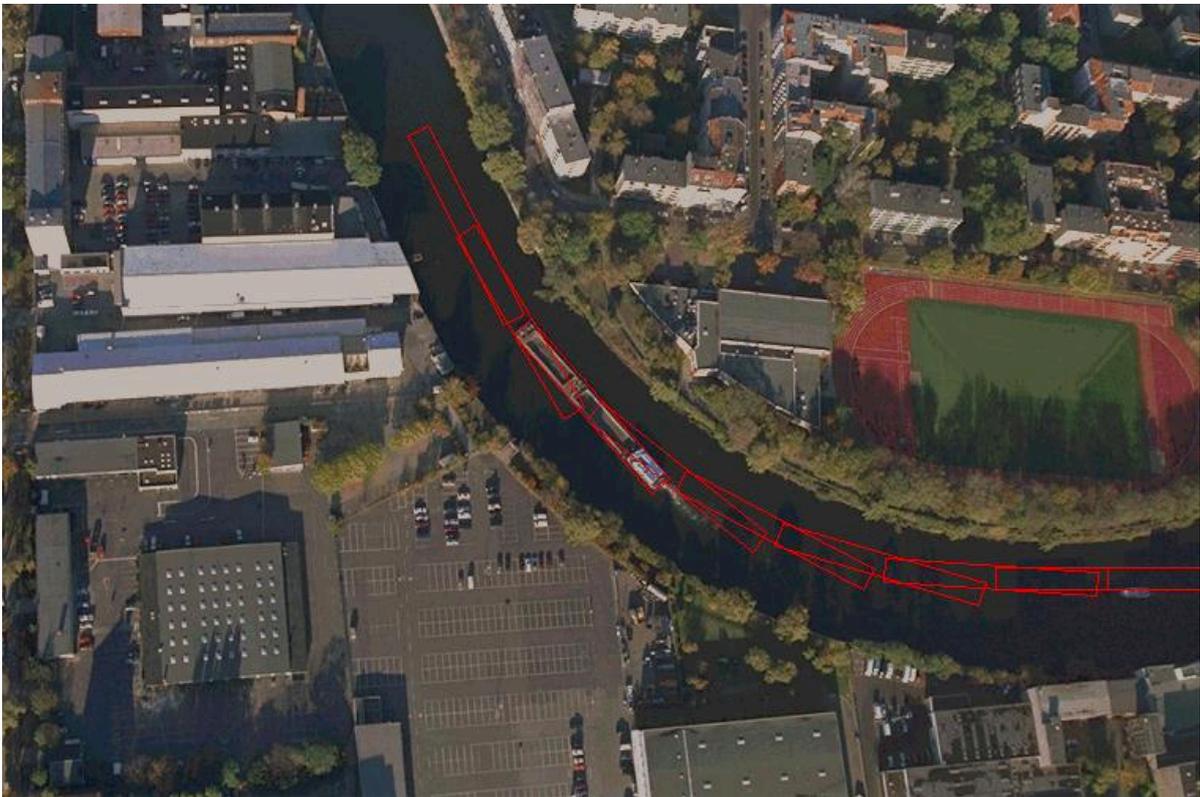


Bild 4: Vergleich berechnete Schleppkurve mit Luftaufnahme im Spreebogen in Berlin

Diese Schleppkurven berücksichtigen automatisch die Unterschiede des nautischen Verhaltens der Schiffe bei der Kurveneinfahrt im Vergleich zur Kurvenausfahrt. Ebenso werden in Kurven mit kleinen Zentriwinkeln die notwendigen Fahrinnenverbreiterungen nicht im vollen Umfang wirksam, wie es die pauschale Berechnung mit den vorgenannten Formeln erfordern würde. Für derartige Situationen werden Abminderungen errechnet. Ebenso können die Fahrinnenverläufe in Bereichen mit unmittelbar aneinander folgenden Krümmungen konstruiert werden.

Um die Übernahme der Berechnungsergebnisse in die Trassierungsumgebung MicroStation zu erleichtern, wurden die Konstruktionsschritte so aufbereitet, dass sie direkt als MicroStation- Applikation programmiert werden konnten. Im Ergebnis ist das Werkzeug „TRASSE“ entstanden, mit dem Fahrrinnen innerhalb der CAD-Arbeitsumgebung der Wasserstraßenverwaltung projiziert werden können /2.4/.

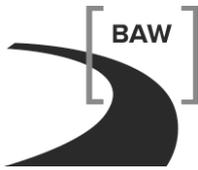
Da sich das Prinzip der Einzelpositionierung bei der Planung von Fahrrinnen in nicht fließenden Gewässern bewährt hat, sollte versucht werden, dieses auf Fließgewässer zu übertragen. Ausschlaggebend für diese Technik sind Kenntnisse über die Lage des taktischen Drehpunktes am Schiff. Durch Naturmessungen konnte nachgewiesen werden, dass die Position des taktischen Drehpunktes analog zu den nicht fließenden Gewässern unabhängig vom Kurvenradius ist, sich aber in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit, Fahrgeschwindigkeit des Schiffes und seiner Fahrtrichtung bezogen auf den Fluss ändert. So ergaben sich folgende Anforderungen an das zu entwickelnde Verfahren:

- Der Einfluss der Fließgeschwindigkeit des Gewässers sowie der Fahrgeschwindigkeit und der Fahrtrichtung des Schiffes auf den Verkehrsflächenbedarf eines Binnenschiffes muss abgebildet werden.
- Das Verfahren sollte für alle in der Binnenschifffahrt vorkommenden Schiffstypen gelten.
- Es sollten Kurvenradien von der Geradeausfahrt bis runter zu einer Größe von einer Schiffslänge berücksichtigt werden.
- Die Ergebnisse der Trassierung sollten sich in das CAD-System MicroStation integrieren lassen.

3 Flussbauliche Modellierung

Sollen die Fließgeschwindigkeiten in dem zu entwickelnden Trassierungsverfahren berücksichtigt werden, so müssen diese im Vorfeld bekannt sein. Zu Beginn des F+E Vorhabens stand ein eindimensionales vernetztes instationäres hydronumerisches Modell des Rheingaus zwischen Mainz (Rh-km 498) und Bingen (Rh-km 529) zur Verfügung. Dieses wurde in den ersten beiden Jahren bis St. Goar (Rh-km 556) erweitert und auf die Belange der Fahrdynamik abgestimmt, indem Fließgeschwindigkeiten und Tiefen über den Fahrrinnenbereich gemittelt ausgegeben werden konnten. Verfahrenstechnische Weiterentwicklungen wie ein modularer Modellaufbau sowie eine direkte Anbindung an die Pegel Datenbanken der WSV wurden initiiert. Ende 2007 stand der gesamte freifließende Rhein von Iffezheim (Rh-km 335) bis Lobith (Rh-km 865) als kalibriertes hydrodynamisch-numerisches Modell zur Verfügung.

Durch die Anbindung an die Datenbanken der WSV wurde das Modell zu einem **Operativen Dynamischen Modell (OpDyMo)** erweitert. Dieses operative dynamische Modell berechnet über Pegelanbindungen quasi online die Wasserspiegellagen für ein vorgegebenes Zeitinter-



vall. In der BAW lieferten die Modellergebnisse die hydrodynamischen Datengrundlagen für fahrdynamische Untersuchungen, Auswertungen eingemessener Schiffe, insbesondere aus dem Naturversuch der WSV „ARGO“, Engpassanalysen und Befahrbarkeitsoptimierungen des freifließenden Rheins. Im BAW-Bericht vom September 2007 /3.1/ sind die flussbaulichen Modellierungen beschrieben und werden hier zusammengefasst und gekürzt wiedergegeben.

3.1 Hydrodynamisch-numerische Rheinmodelle von Iffezheim bis Lobith (Rh-km 336,210 - 865,500)

Der freifließende Rhein von Iffezheim bis Lobith (Rh-km 336,210 - 865,500) wurde in mehreren Einzelmodellen eindimensional hydrodynamisch-numerisch mit dem Berechnungsverfahren **CasCade** modelliert. Es handelt sich dabei um insgesamt elf instationäre, vernetzte Einzelmodelle, deren Modellgrenzen in **Bild 5** dargestellt sind.

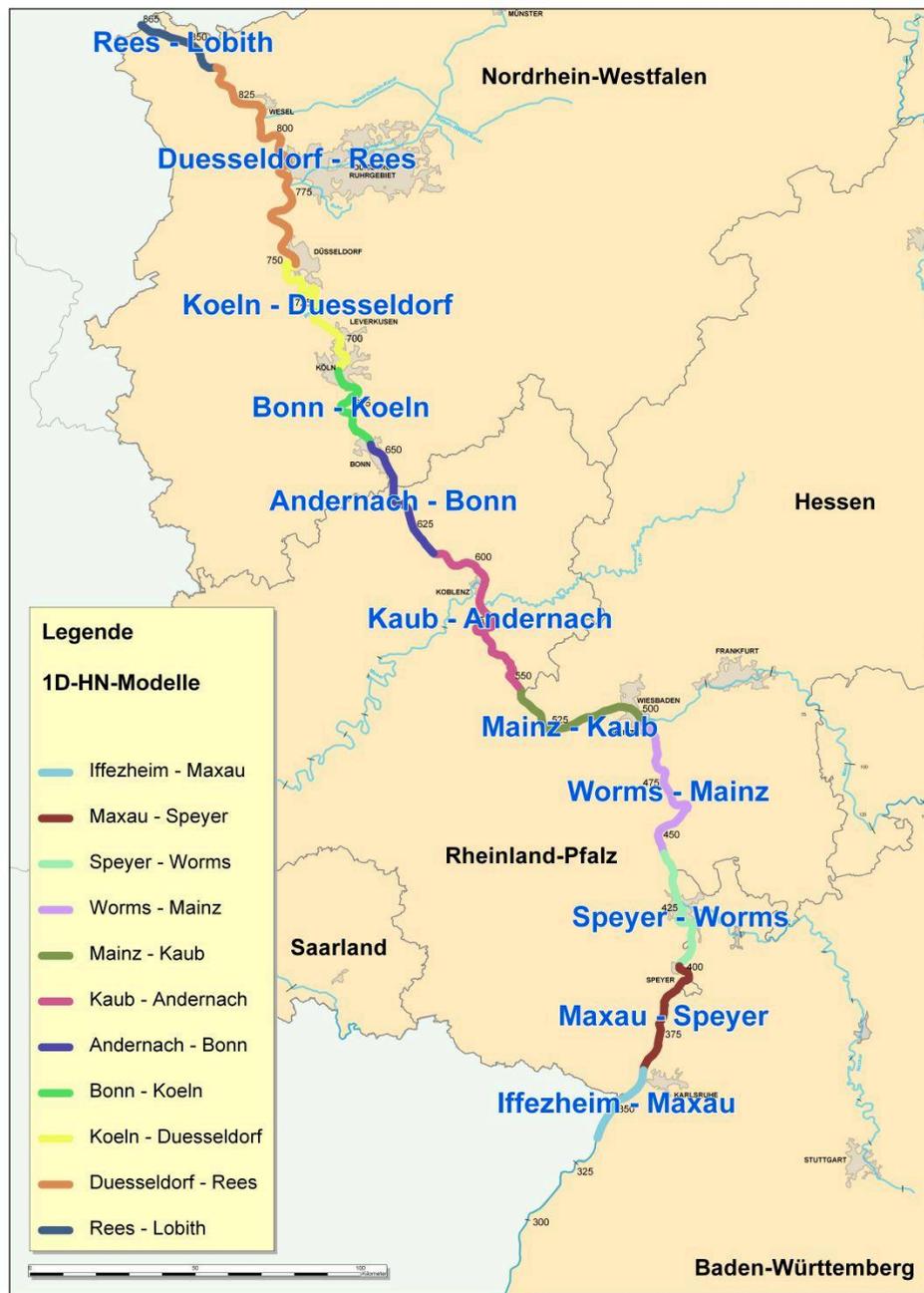


Bild 5: 1D-HN-Einzelmodelle von Iffezheim (Rh-km 336,210) bis Lobith (Rh-km 865,500)

3.2 Modellinformationen und Datengrundlage

Der modulare Aufbau gewährleistet eine stetige Aktualisierung der Gewässergeometrie. Die Einzelmodelle werden getrennt voneinander kalibriert und validiert und werden je nach verfügbaren aktuellen Fixierungen über das Abflussspektrum von NQ bis HQ aufbereitet.

Der Aufbau in Einzelmodelle hat sich bewährt und ermöglicht eine Aufgliederung der zu betrachtenden Gesamtstrecke (Rh-km 336,210 – 865,500) des freifließenden Rheins in drei größere Teilmodelle mit Längen zwischen 162 und 190 km. Damit wurde der Rechenaufwand begrenzt und die Datenhandhabung erleichtert.

Damit die Längen der einzelnen Teilmodelle etwa gleich sind und am entsprechenden unteren Modellrand ein Pegel mit Schlüsselkurve existiert, wurden als Modellgrenzen die Pegel Mainz und Köln ausgewählt.

Folgende drei Teilmodelle wurden aus den elf Einzelmodellen kombiniert:

Tabelle 1: Zusammenfassung zu 3 Teilmodellen von Iffezheim bis Lobith

Iffezheim– Mainz	(Rh-km 336,210 – 498,300)
Mainz – Köln	(Rh-km 498,300 – 688,000)
Köln – Lobith	(Rh-km 688,000 – 865,500)

3.3 Ergebnisse der Modellrechnungen

Das querprofilorientierte Programmsystem CasCade löst die eindimensionalen Flachwassergleichungen (Saint-Venant-Gleichungen) und liefert die breiten- und tiefengemittelten Fließgeschwindigkeiten und Wasserspiegellagen. Für die drei Teilmodelle wird ein stationärer Fächer über das Abflussspektrum von NQ bis HQ in 10 – 25 m³/s Abflussschritten berechnet. Die Darstellung der Ergebnisse in Längsrichtung des Modells erfolgt mit dem Programm OpDyMo und die Visualisierung im Querschnitt und zugleich im Lageplan erfolgt mit dem Programm ProLag.

Tabelle 2: Abflussspektrum der Teilmodelle

Teilmodelle	Rh-km	NQ - HQ [m ³ /s]
Iffezheim - Mainz	336,210 – 498,300	500 - 5000
Mainz - Köln	498,300 – 688,000	500 - 7000
Köln - Lobith	688,000 – 865,500	505 - 10005

Tabelle 3: Zuflüsse im Modellgebiet

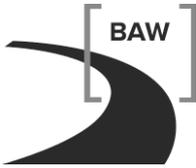
Zufluss	Rh-km	NQ - HQ [m ³ /s]
Murg	344,600	50 - 500
Neckar	428,200	28 - 275
Main	496,800	87 - 866
Nahe	529,100	10 - 500
Lahn	585,700	10 - 400
Mosel	592,200	80 - 3500
Ahr	629,300	10 - 200
Sieg	659,300	20 - 400
Wupper	703,300	5 - 40
Erft	735,500	5 - 25
Ruhr	780,100	10 - 150
Emscher	797,700	5 - 25
Lippe	814,400	25

3.4 OpDyMo – Operatives Dynamisches Modell

Das Programm OpDyMo visualisiert die verschiedenen berechneten und gemessenen Daten (Wasserspiegellagen, Geschwindigkeiten, Sohlagen, Pegeldata, ...) in Längsrichtung des Modells bzw. über die Zeit. Bei instationären Berechnungen können die Ergebnisse entlang der Fließstrecke zu jedem Zeitschritt nacheinander als Film dargestellt werden /3.2/.

Die berechnete Wasserspiegellage und mittlere Fließgeschwindigkeit werden jeweils für die drei Teilmodelle beispielhaft für einen ausgewählten Abfluss in Bild 6 und **Bild 7** dargestellt. Die Pegelstände sind in der Einheit Meter über dem Pegelnullpunkt [müPNP] des jeweiligen Richtpegels angegeben.

Bild 6 zeigt den Talweg, die mittlere Sohlhöhe im Fahrrinnenbereich, die berechnete Wasserspiegellage entlang des jeweiligen Modellgebiets (Bsp.: Mainz-Köln) und die entsprechenden Richtpegelstände. Zum Vergleich der Wasserspiegellagen werden vorhandene



Fixierungen verschiedener Abflussbereiche eingeladen und zusätzlich an den Pegellatten die Hochwassermarken I und II gekennzeichnet. Außerdem werden noch die minimale und maximale Wasserspiegellage für das berechnete Abflussspektrum angezeigt.

Bild 7 zeigt die mittlere Fließgeschwindigkeit entlang des jeweiligen Modellgebiets und die entsprechenden Richtpegelstände. Zusätzlich sind auch hier die minimale und maximale mittlere Fließgeschwindigkeit für das berechnete Abflussspektrum angezeigt.

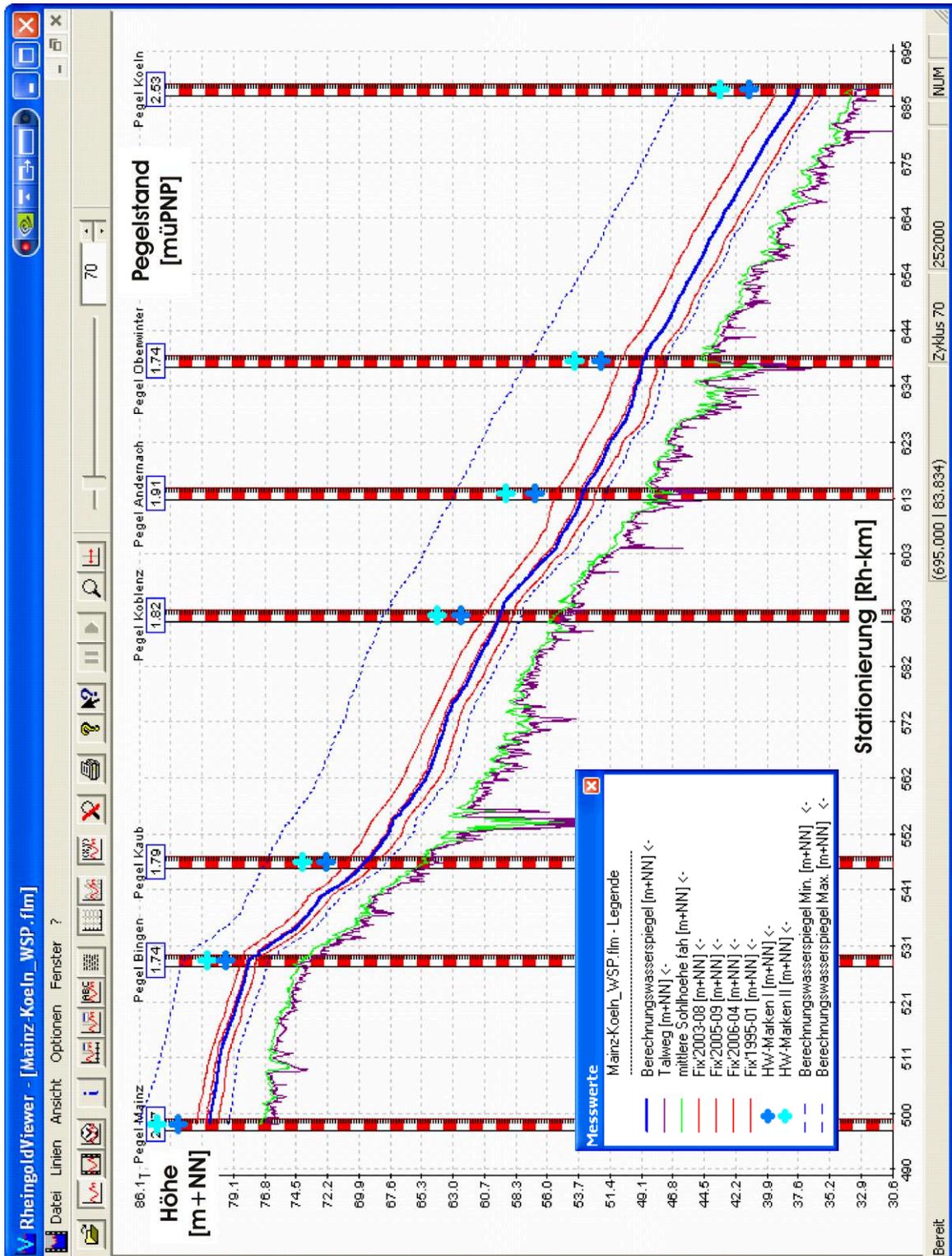


Bild 6: Teilmodell Mainz-Köln; Darstellung des Talwegs, der mittleren Sohlhöhe im Fahrrinnenbereich, der berechneten Wasserspiegellage, ausgewählte Fixierungen und der entsprechenden Richtpegelstände der Hochwassermarken I und II entlang des Modellgebiets

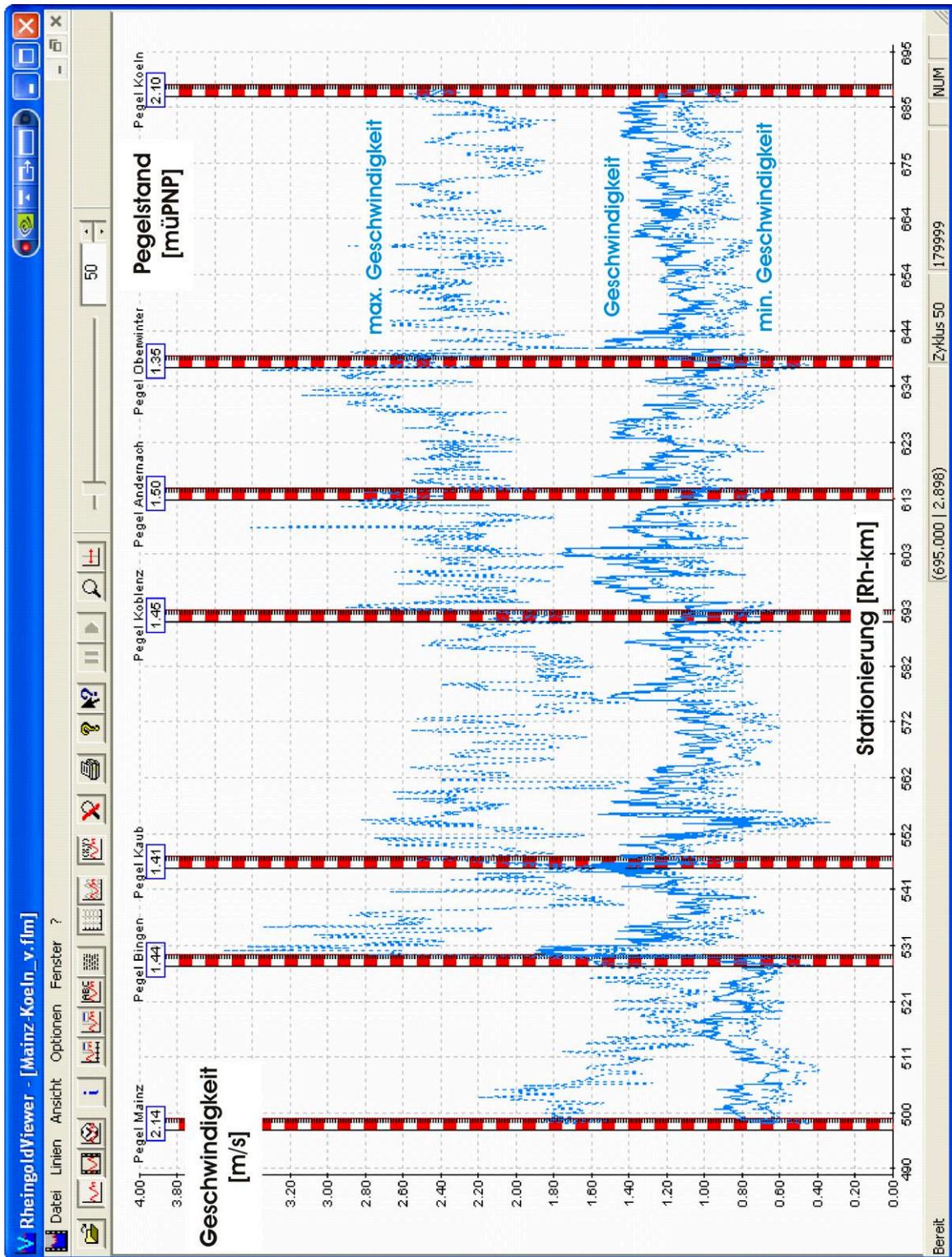


Bild 7: Teilmodell Mainz-Köln; Darstellung der minimalen, maximalen und mittleren Fließgeschwindigkeit und der entsprechenden Richtpegelstände entlang des Modellgebiets

3.5 Profilgeometrien und Wasserspiegellagen - ProLag

Das Programm ProLag stellt die Profilgeometrien und Wasserspiegellagen zugleich im Querschnitt und Lageplan graphisch dar (siehe Bild 8 und Bild 9). Weitere Dateien wie z.B. eine Fahrinnen- oder Fahrspurbreitendatei können zur Geometrie geladen und sobald eine Wasserspiegellagedatei eingelesen wurde, analysiert werden. Zahlreiche Parameter wie mittlere Fließgeschwindigkeiten, Abflussmengen, Flächen, Schubspannungen, Froude- und Reynoldszahlen, mittlere Sohlhöhen können profil- oder segmentweise, fahrinnenbezogen oder sogar fahrspurbezogen berechnet werden. Der instationäre Ablauf von Berechnungen im Querprofil bzw. Lageplan kann ebenfalls betrachtet werden. Außerdem dient das Programm der Bearbeitung und Segmentierung der einzelnen Querprofile. Eine Kurzbeschreibung der wichtigsten Funktionen erhält man im Menü des Programms unter Hilfethemen.

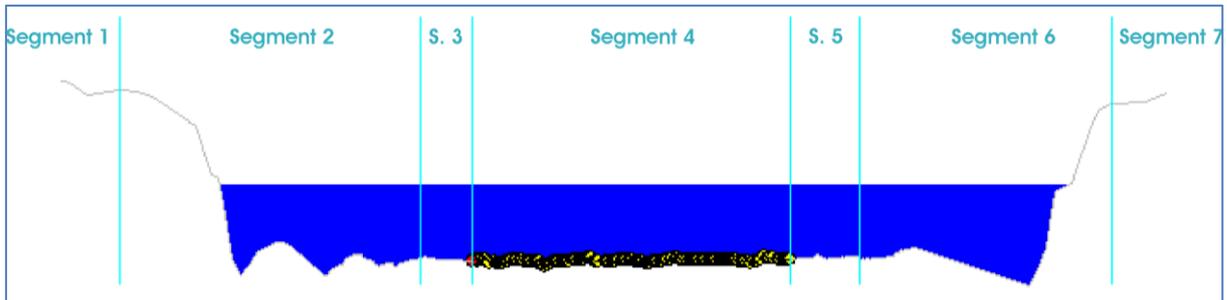


Bild 8: Querprofilardarstellung (Rh-km 365,200) mit dem Programm ProLag

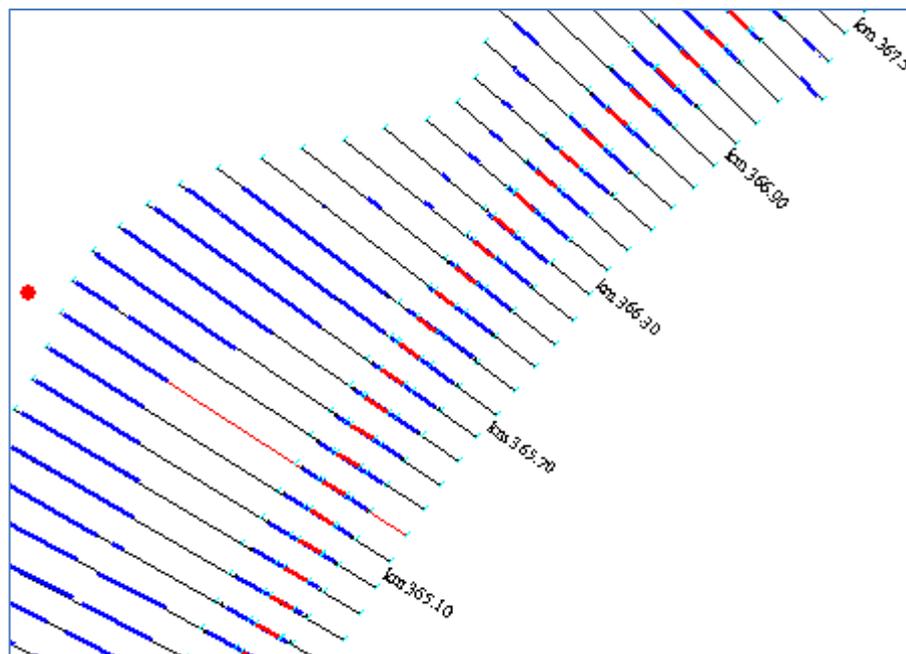


Bild 9: Darstellung der Querprofile im Lageplan mit dem Programm ProLag

In ProLag wurden für die drei Teilmodelle jeweils die Geometrie, die Strömungsinformationen (Wasserspiegellage, Durchfluss und Geschwindigkeit), der Strömungszustand (stationär bzw. instationär), der Fahrrinnenbereich und die Lage der Querprofile im Lageplan zusammengestellt. Zusätzlich wurden im jeweiligen Modellgebiet befindliche Pegel eingerichtet. Bild 10 zeigt beispielhaft für das Querprofil bei Rh-km 365,200 die Benutzeroberfläche des Programms ProLag.

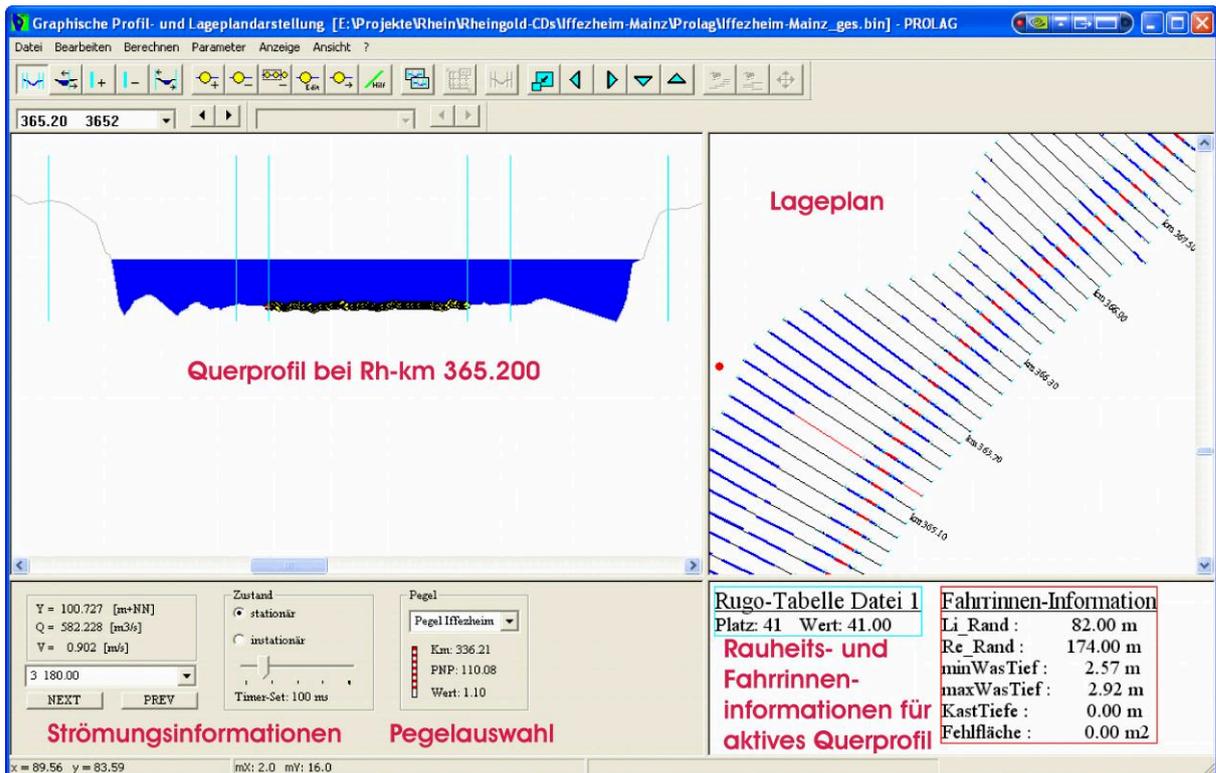


Bild 10: Benutzeroberfläche des Programms ProLag

3.6 Modellstruktur

Für die einzelnen Modelle sind die Modellstrukturpläne im pdf-Format dargestellt. Beispielhaft ist in Bild 11 ein Auszug einer Modellstruktur von Rh-km 375,600 – 386,800 aufgeführt.

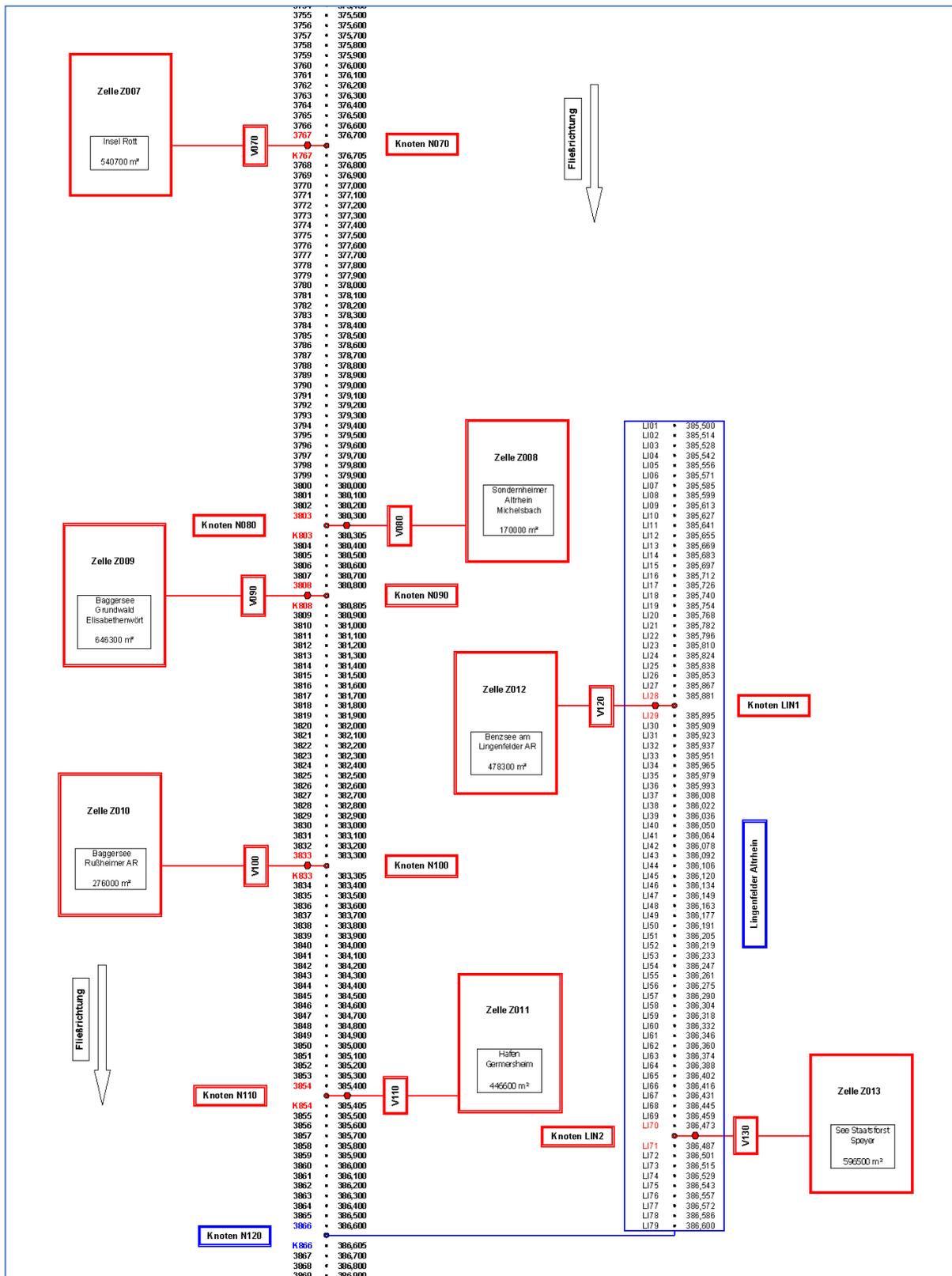


Bild 11: Auszug einer Modellstruktur Rh-km 375,600 – 386,800

3.7 Online-Pegelanbindung und erweiterter OpDyMo-Betrieb

Die Anbindung einer Datenbank der Pegelwerte ermöglicht eine Online-Strömungsanalyse, Modellvalidierung und instationäre Kalibrierung. Vergleiche mit Messungen zeigen, dass instationäre Abflussvorgänge über große Fließstrecken mit einer Genauigkeit abgebildet werden können, die ähnlich derjenigen der Eingabedaten ist. Bild 12 zeigt die Eingabemaske der Online-Simulation, in der das Modell, die Start-, Endzeit und das Ausgabeintervall der Berechnung festgelegt werden. Es besteht eine Online-Anbindung an die Pegeldatenbanken der WSD Südwest und WSD West. Das Programm ruft die Wasserspiegellagen der entsprechenden Pegel für den gewählten Zeitraum ab und konvertiert diese automatisch in Eingabedateien, welche zur Berechnung der HN-Modelle benötigt werden. Des Weiteren erfolgt eine Abfrage vorhandener Referenzpegel innerhalb des Modellgebiets, welche zur Kontrolle der Modellergebnisse genutzt werden können. Nach erfolgreicher Datenbankabfrage und Berechnung werden die Ergebnisse (Wasserspiegellagen, Fließgeschwindigkeiten, Abflussmengen u. a. hydraulische Parameter) in dem Programm OpDyMo (Bild 13) automatisch dargestellt. Im Online-Betrieb können somit aktuelle Fließzustände (Wasserspiegellagen, Fließgeschwindigkeiten, ...) für den gewählten Flussabschnitt und das gewählte Zeitintervall sofort angezeigt werden. Das Modellverfahren OpDyMo kann sowohl netzwerkunabhängig als auch über Netzwerk betrieben werden.

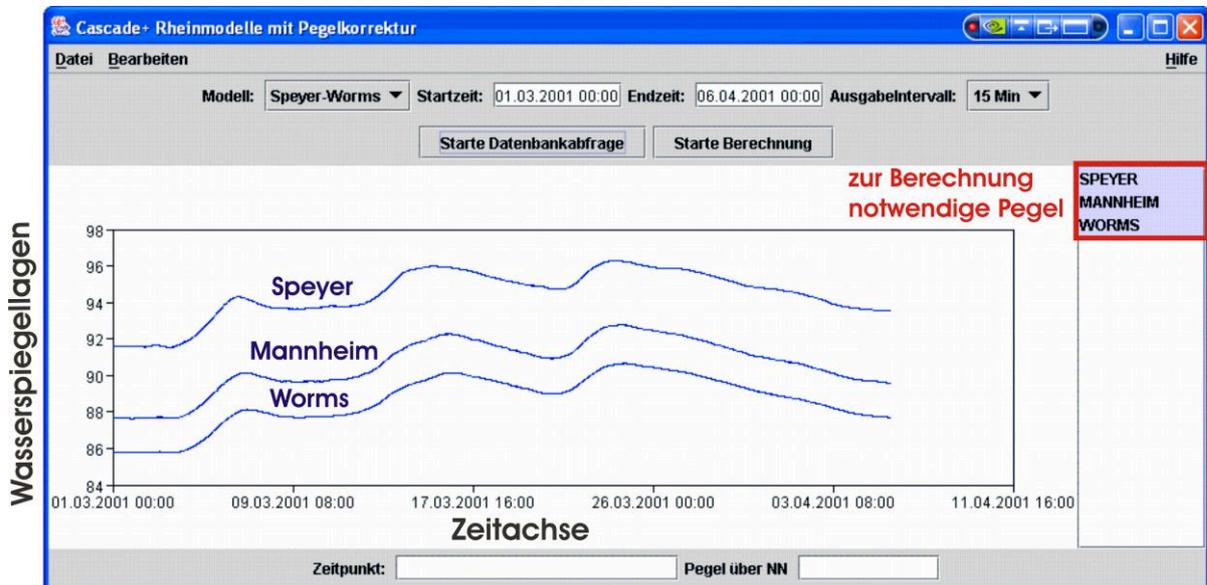


Bild 12: Online-Simulation des Modells Speyer-Worms mit erfolgter Datenbankabfrage für den Zeitraum vom 01.03.2001 bis 06.04.2001, dargestellt ist der Wasserspiegelverlauf an drei verschiedenen Pegeln über den ausgewählten Zeitraum

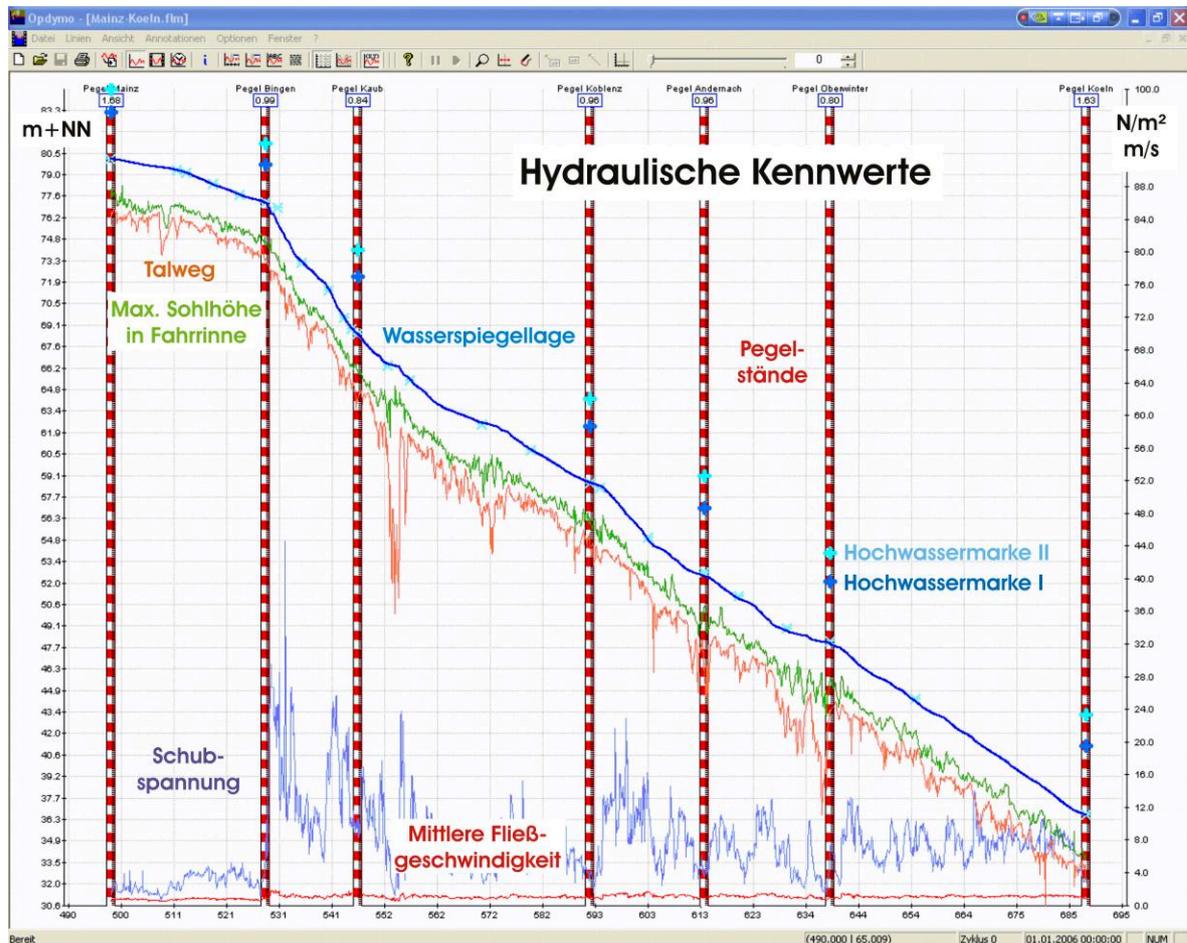


Bild 13: Hydraulische Kennwerte einer instationären Berechnung vom 01.01.2006 des Teilmodells Mainz – Köln

Durch die Korrelation der Ergebnisse mit geometrischen Randbedingungen (Querprofile) werden Tiefen- und Breiten-Engpässe im Fahrrinnenbereich über die betrachtete Fließstrecke lokalisiert und einer Bewertung zugänglich gemacht. Bild 14 zeigt beispielhaft die Lokalisierung der Tiefen-Engstellen des Modells Mainz-Koblenz über die Auswertung der minimalen Wassertiefen im reduzierten Fahrrinnenbereich (von beiden Seiten um 5 m). Bereiche, welche die geforderten Tiefen nicht in der reduzierten Fahrrinnenbreite erreichen, können somit identifiziert werden (Bild 14, Betteck, Rh-km 553,700).

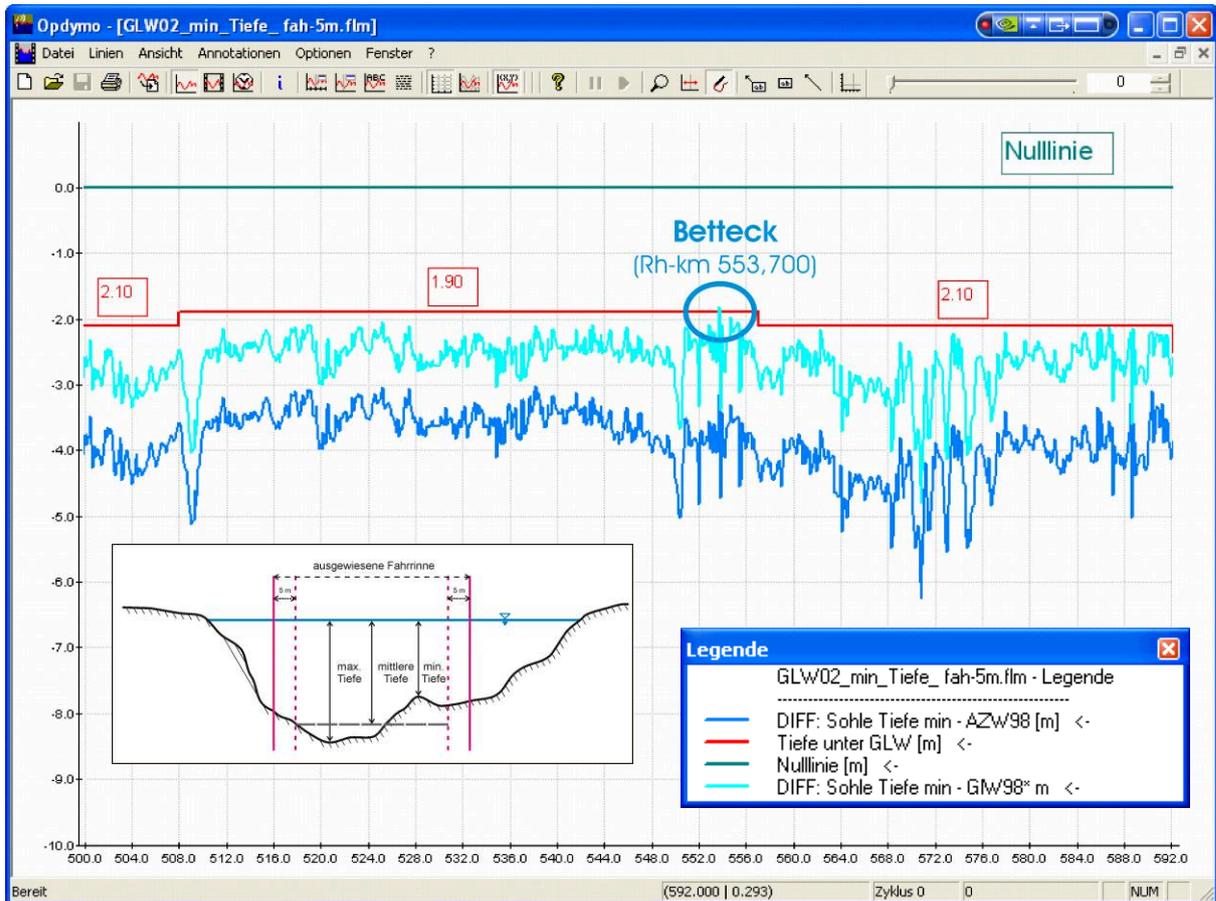


Bild 14: Vergleich der minimalen Tiefen im reduzierten Fahrrinnenbereich unter GIW98* bzw. AZW98 mit den unter GIW02 freigegebenen Tiefen auf der Strecke Mainz bis Koblenz

In Bild 15 ist das Querprofil mit der lokalisierten Tiefen-Engstelle bei Rhein-km 553,700 dargestellt, an dem die angestrebte Tiefe nicht auf der vollen Breite des reduzierten Fahrrinnenbereichs erreicht wird.

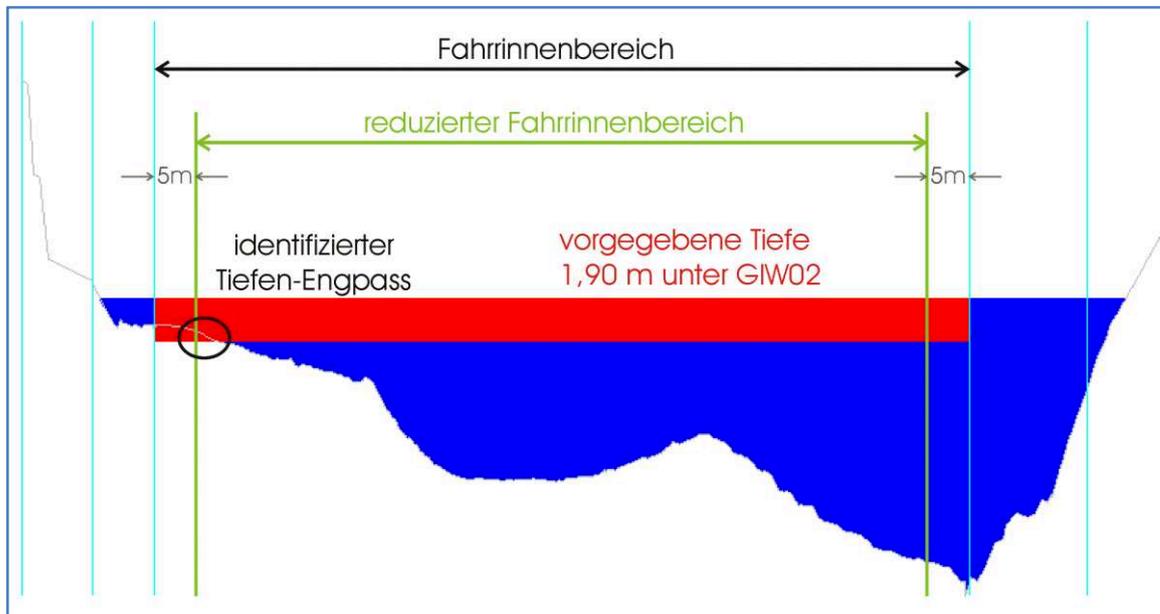


Bild 15: Querprofilarstellung der lokalisierten Engstelle im Fahrrinnenbereich bei Rhein-km 553,700

Eine weitere Möglichkeit ist die Verknüpfung der Modellergebnisse mit den ECDIS-Karten (Electronic Charts Display Information System) der WSV. Aktuelle Informationen über Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten können hinterlegt und bei Bedarf abgerufen werden. Bild 16 zeigt eine Einstellung der ECDIS-Karten zwischen Oberwesel und St. Goar (Betteck, Rh-km 553,700).

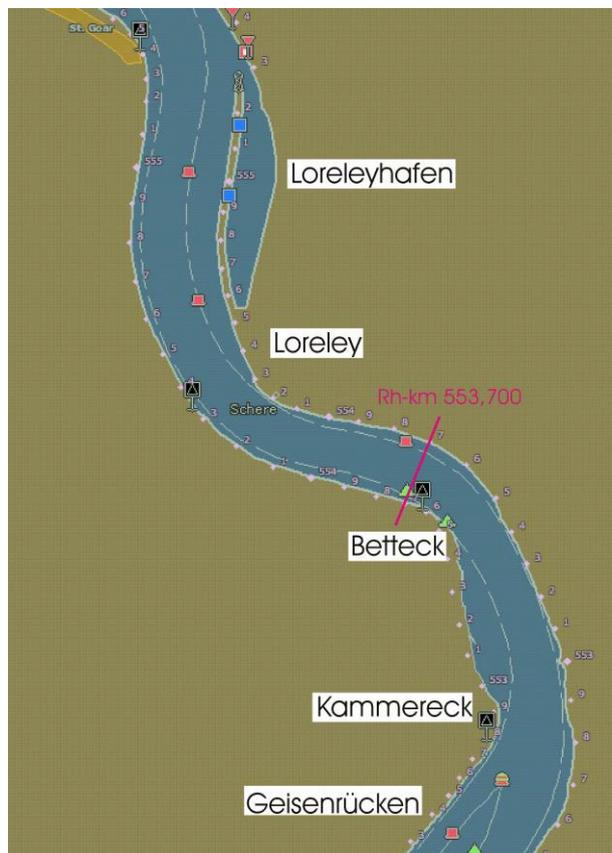


Bild 16: ECDIS-Karten bei Oberwesel und St. Goar (Betteck, Rh-km 553,700)

4 Fahrdynamische Modellierung

In der Aufgabestellung des Forschungsvorhabens ist gefordert, dass der Einfluss der Fließgeschwindigkeit des Gewässers sowie der Fahrgeschwindigkeit und der Fahrtrichtung des Schiffes auf den Verkehrsflächenbedarf eines Binnenschiffes abgebildet werden muss. Die notwendigen Eingangsdaten, also die Fließgeschwindigkeit des Gewässers, sind vorhanden. Für die Ermittlung der Auswirkung der Gewässerströmung auf den Verkehrsflächenbedarf eines Binnenschiffes wird ein fahrdynamisches Modell benötigt, welches die Bewegung des Schiffes innerhalb des Fließgewässers abbildet. Hierfür wird ein ortsfestes Koordinatensystem $X_0Y_0Z_0$ benötigt, um zu jedem gewünschten Zeitpunkt "t" die genaue Lage des Schiffes im Raum beschreiben zu können. Da das Schiff sich im Medium Wasser bewegt und die örtliche Umströmung die Kräfte am Schiffskörper maßgeblich bestimmen, ist es sinnvoll, ein zweites schiffsfestes Koordinatensystem XYZ einzuführen, mit dessen Hilfe die Umströmung des Schiffskörpers beschrieben werden kann. Da das Schiff sich allgemein im Raum unter Zulassung aller Freiheitsgrade bewegen soll, handelt es sich in beiden Fällen um ein 3-dimensionales Koordinatensystem. Die Umrechnung der Koordinaten beider Koordinatensysteme untereinander erfolgt nach den Gleichungen 1.

$$\begin{aligned}x_0 &= a + x \cdot \cos(\alpha_1) + y \cdot \cos(\alpha_2) + z \cdot \cos(\alpha_3) \\y_0 &= b + x \cdot \cos(\beta_1) + y \cdot \cos(\beta_2) + z \cdot \cos(\beta_3) \\z_0 &= c + x \cdot \cos(\chi_1) + y \cdot \cos(\chi_2) + z \cdot \cos(\chi_3)\end{aligned}\tag{Gl. 1}$$

In diesen Gleichungen sind x_0 , y_0 und z_0 die Koordinaten eines beliebigen Punktes für das raumfeste Koordinatensystem und x , y , und z die Koordinaten desselben Punktes für das schiffsfeste Koordinatensystem. Die Koeffizienten a , b und c sind die Koordinaten des Ursprungs des schiffsfesten Koordinatensystems innerhalb des raumfesten Systems. Die Winkel in den Kosinusfunktionen haben folgende Bedeutungen:

- α_1 Winkel zwischen den Achsen X_0 und X
- α_2 Winkel zwischen den Achsen X_0 und Y
- α_3 Winkel zwischen den Achsen X_0 und Z
- β_1 Winkel zwischen den Achsen Y_0 und X
- β_2 Winkel zwischen den Achsen Y_0 und Y
- β_3 Winkel zwischen den Achsen Y_0 und Z
- χ_1 Winkel zwischen den Achsen Z_0 und X
- χ_2 Winkel zwischen den Achsen Z_0 und Y
- χ_3 Winkel zwischen den Achsen Z_0 und Z

Die geometrische Bedeutung der Gleichungen 1 ist in Bild 17 für zwei Koordinatensysteme zweiter Ordnung beispielhaft dargestellt.

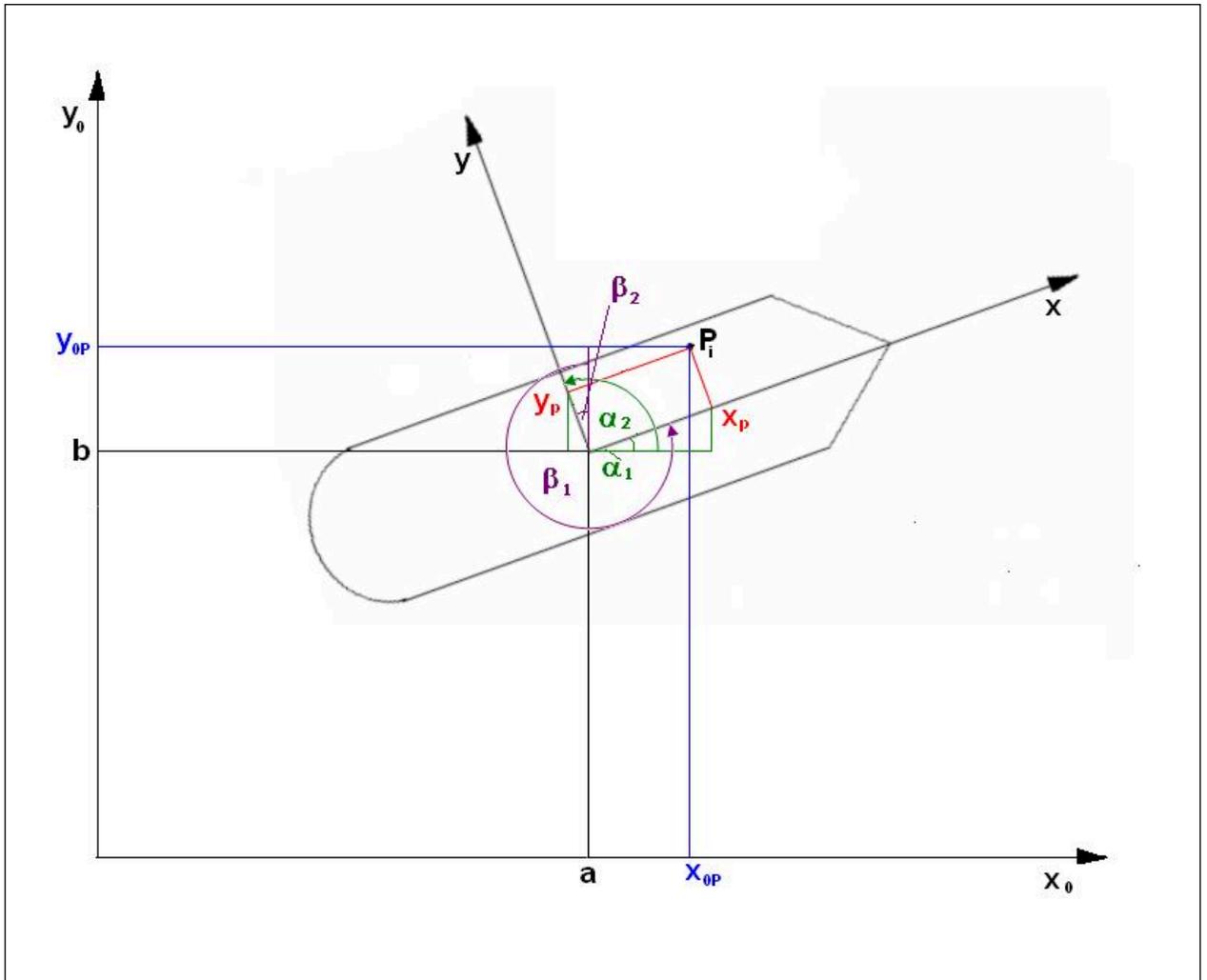


Bild 17: Definition der Koordinatensysteme zur Beschreibung der Schiffsbewegung

Für die Beschreibung der Bewegung des Schiffes wird das 2. Newtonsche Axiom genutzt welches besagt, dass die Beschleunigung a einer Masse m der einwirkenden Kraft F proportional und ihr gleichgerichtet ist.

$$F = m \cdot a \tag{Gl.2}$$

Wird von beiden Seiten der Gleichung F subtrahiert folgt:

$$0 = m \cdot a - F \tag{Gl.3}$$

Anschließend werden beide Seiten der Gleichung mit einer infinitesimalen Verrückung δs multipliziert.

$$0 = (m \cdot a) \cdot \delta s - F \cdot \delta s$$

Gl.4

Bei δs handelt es sich um virtuelle Verrückungen, die außer, dass sie die Gleichung erfüllen auch der Nebenbedingung genügen müssen, dass die Verrückungen im rechten Winkel zu eventuell vorhandenen Zwangskräften stehen. Sie müssen also vorgegebenen Zwangsbahnen folgen. Im Gegensatz zu realen Bewegungen, die innerhalb eines Zeitintervalls stattfinden, werden mit den virtuellen Verrückungen z.B. Bewegungen auf der Oberfläche eines Körpers beschrieben, der sich durch den Raum bewegt. Die Bewegung des Körpers wäre dann eine reale Bewegung und die Bewegung von Massenpunkten auf der Körperoberfläche, die durch Nebenbedingungen beschrieben wird, virtuell. Die virtuellen Verrückungen sind unabhängig von der Bewegung des Körpers. Die Nebenbedingungen für die virtuellen Verrückungen können Funktionen von Koordinaten bzw. Strecken (skleronome Nebenbedingung), zusätzlich von der Zeit (rheonome Nebenbedingung) und von der erste Ableitung nach der Zeit (anholonome Nebenbedingung) enthalten und müssen stets 0 werden /4.1/.

Da ein fahrendes Schiff in seiner unmittelbaren Umgebung die Bewegung von Wasserteilchen initiiert, die sich quasi auf der Oberfläche des Schiffskörpers bewegen, ist dieser Ansatz dazu geeignet, die Schiffsbewegung zu beschreiben.

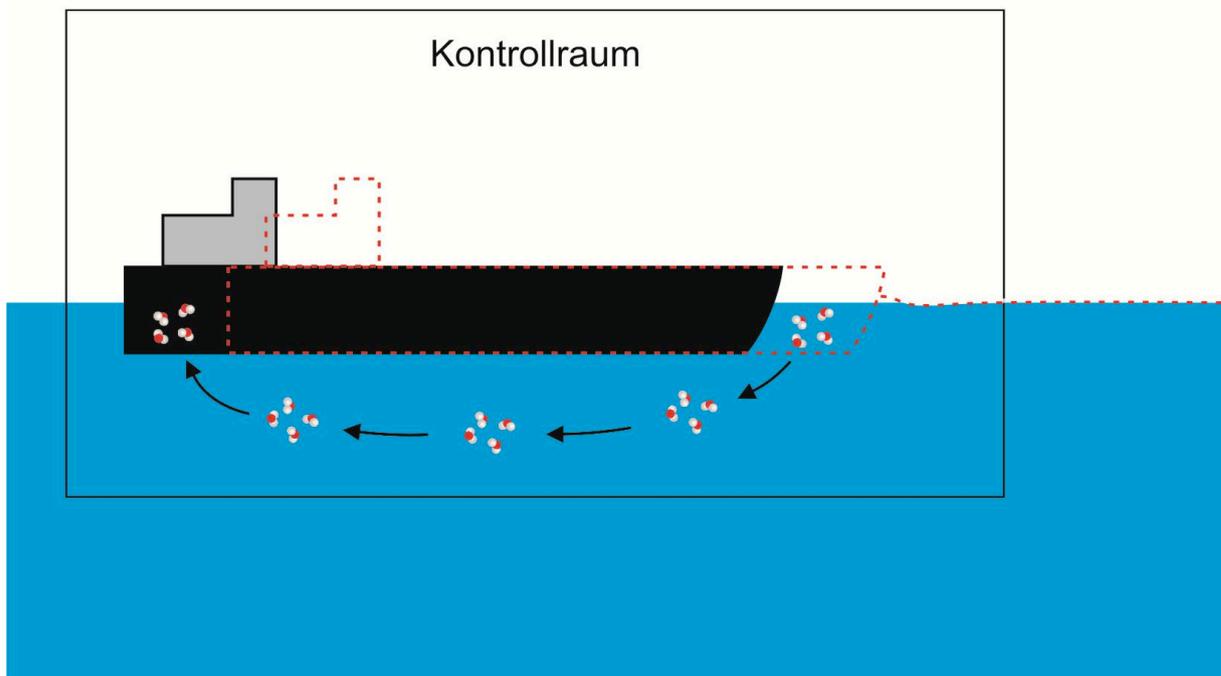


Bild 18: Definition des Kontrollraumes für die Beschreibung der Schiffsbewegung

Zu diesem Zweck wird um das Schiff ein Kontrollraum gelegt, der groß genug ist, um die durch die Schiffsbewegung induzierte Bewegung der Wasserteilchen mit zu erfassen (Bild

18). Bewegt sich ein Schiff, so wird in dem Bereich, in dem vor der Bewegung Wasser war und nach dem nächsten Zeitschritt sich das Schiff befindet, das Wasser verdrängt. In dem Bereich, in dem vor der Bewegung das Schiff war und in dem Zeitschritt nach der Bewegung kein Schiff mehr ist, wird das Wasser wieder aufgefüllt. Das bedeutet, dass im Verlauf der Schiffsbewegung ständig um das Schiff herum Wasserteilchen bewegt werden. Die Summe der Masse dieser bewegten Wasserteilchen nennt man hydrodynamische Masse. In Bild 18 ist dieses Prinzip für die Bewegung in Längsrichtung des Schiffes dargestellt. Es gilt für alle Freiheitsgrade der Bewegung.

Da die Bewegung in einem dreidimensionalen Raum beschrieben werden soll, setzt sich die virtuelle Verrückung δs aus δx , δy und δz zusammen. Die Koordinaten x , y und z sind von der Zeit t abhängig und die resultierenden Funktionen stetig und differenzierbar. Somit kann die Beschleunigung a durch die zweite Ableitung der Koordinaten x , y und z nach der Zeit beschrieben werden. Werden jetzt noch anstatt der Bewegung einer Punktmasse die Bewegungen vieler Punktmassen betrachtet, so kann die Gleichung 4 wie folgt geschrieben werden.

$$0 = \sum \left[\left(m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} - F_x \right) \cdot \delta x + \left(m \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} - F_y \right) \cdot \delta y + \left(m \cdot \frac{d^2 z}{dt^2} - F_z \right) \cdot \delta z \right] \quad \text{Gl.5}$$

Dies ist das Prinzip von d'Alembert (1743).

Nach dem die Gl. 5 ausmultipliziert wurde, lässt sich der Term

$$\sum (-F_x \cdot \delta x - F_y \cdot \delta y - F_z \cdot \delta z)$$

zusammenfassen, der die Arbeit δU der Kräfte F_x , F_y und F_z für die virtuellen Verrückungen darstellt. Damit wird aus Gl.5

$$0 = -\delta U + \sum \left(m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} \cdot \delta x + m \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} \cdot \delta y + m \cdot \frac{d^2 z}{dt^2} \cdot \delta z \right) \quad \text{Gl.6}$$

Die Gl. 5 soll weiter umgeformt werden. Mit Hilfe der Produktregel kann das Produkt aus der zweiten Ableitung der Koordinaten der Massenpunkte nach der Zeit und der zugehörigen virtuellen Verrückung wie folgt umgeformt werden. Beispielhaft für die Verrückung in x - Richtung gilt:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dt} \cdot \delta x \right) = \frac{d^2 x}{dt^2} \cdot \delta x + \frac{dx}{dt} \cdot \frac{d}{dt} \delta x$$

Umgestellt wird das o.g. Produkt durch folgenden Term ersetzt:

$$\frac{d^2x}{dt^2} \cdot \delta x = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dt} \cdot \delta x \right) - \frac{dx}{dt} \cdot \frac{d\delta x}{dt}$$

In dieser Gleichung kann der letzte Term, der die Ableitung der virtuellen Verrückung nach der Zeit t beschreibt, wie folgt umgeformt werden:

$$\frac{d\delta x}{dt} = \frac{d(x + \delta x)}{dt} - \frac{dx}{dt} = \delta \frac{dx}{dt}$$

Wenn sich also x in einem Intervall t um δx ändert, so ändert sich auch die Ableitung nach der Zeit um den Zuwachs $\delta dx/dt$. Damit wird der letzte Term der Gleichung zu

$$\frac{dx}{dt} \delta \frac{dx}{dt}$$

Dieser Term wird mit Hilfe der Produktregel (δ wird wie ein konstanter Faktor behandelt) weiterentwickelt:

$$\frac{dx}{dt} \delta \frac{dx}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{dx}{dt} \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = 2 \cdot \frac{d^2x}{dt^2} \cdot \frac{dx}{dt}$$

$$\frac{1}{2} \cdot \delta \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 = \frac{d^2x}{dt^2} \cdot \frac{dx}{dt}$$

Mit diesen neuen Termen kann die Gl. 6 geändert werden.

$$0 = -\delta U + \sum \left(\begin{aligned} & m \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dt} \cdot \delta x \right) - m \cdot \frac{1}{2} \cdot \delta \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + m \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{dy}{dt} \cdot \delta y \right) - m \cdot \frac{1}{2} \cdot \delta \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 + \dots \\ & + m \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{dz}{dt} \cdot \delta z \right) - m \cdot \frac{1}{2} \cdot \delta \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 \end{aligned} \right) \quad \text{Gl.7}$$

In obiger Gleichung steht δ für die Variation. Da die Variation einer Summe gleich der Summe der Variation der einzelnen Teile ist, kann die Gleichung weiter umgeformt werden.

$$0 = -U - \delta \sum \frac{m}{2} \cdot \left(\left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 \right) + \frac{d}{dt} \sum m \cdot \left(\frac{dx}{dt} \cdot \delta x + \frac{dy}{dt} \cdot \delta y + \frac{dz}{dt} \cdot \delta z \right) \quad \text{Gl. 8}$$

Der zweite Summand in dieser Gleichung gibt die Variation der kinetischen Energie des Systems von Punktmassen an und wird mit T bezeichnet.

$$\delta U + \delta T = \frac{d}{dt} \sum m \cdot \left(\frac{dx}{dt} \cdot \delta x + \frac{dy}{dt} \cdot \delta y + \frac{dz}{dt} \cdot \delta z \right) \quad \text{Gl. 9}$$

Dies ist die Lagrangesche Zentralgleichung. Sie wird im Weiteren mit dt multipliziert und anschließend zwischen zwei beliebigen Werten t (t₀ und t₁) integriert.

$$\int_{t_0}^{t_1} (\delta U + \delta T) dt = \left[\sum m \cdot \left(\frac{dx}{dt} \cdot \delta x + \frac{dy}{dt} \cdot \delta y + \frac{dz}{dt} \cdot \delta z \right) \right]_{t_0}^{t_1} \quad \text{Gl. 10}$$

Wenn man den virtuellen Verrückungen noch die neue Beschränkung auferlegt, dass sie sämtlich für t₀ und t₁ verschwinden, erhält man das Hamiltonsche Prinzip.

$$\int_{t_0}^{t_1} (\delta U + \delta T) dt = 0 \quad \text{Gl. 11}$$

Mit Hilfe dieses Prinzips hat Prof. Gustav Kirchhoff erstmals in seiner Zeit in an der Universität in Heidelberg von 1854 - 1874 die Bewegungsgleichungen für ein Schiff unter Berücksichtigung der hydrodynamischen Massen für beide eingangs beschriebenen Koordinatensysteme hergeleitet. Veröffentlicht wurde diese Herleitung im Jahr 1876 vom Prof. Wien /4.1/. Die auf den Schiffskörper wirkenden äußeren Kräfte und Momente sollen je nachdem, auf welches der beiden Koordinatensysteme sich bezogen wird, in Kraftkomponenten in Richtung der Koordinatenachsen und in Momente um die Koordinatenachsen unterteilt werden. Für das raumfeste Koordinatensystem lauten die Symbole für die Kräfte F_{x0}, F_{y0} und F_{z0} und für die Momente M_{x0}, M_{y0} und M_{z0}, für das schiffsfeste Koordinatensystem analog F_x, F_y, F_z und M_x, M_y und M_z.

Die Bewegungsgleichungen bezogen auf das raumfeste Koordinatensystem lauten:

$$\begin{aligned}
 F_{x0} &= \frac{d}{dt} \left(\alpha 1 \cdot \frac{\partial T}{\partial V_x} + \alpha 2 \cdot \frac{\partial T}{\partial V_y} + \alpha 3 \cdot \frac{\partial T}{\partial V_z} \right) \\
 F_{y0} &= \frac{d}{dt} \left(\beta 1 \cdot \frac{\partial T}{\partial V_x} + \beta 2 \cdot \frac{\partial T}{\partial V_y} + \beta 3 \cdot \frac{\partial T}{\partial V_z} \right) \\
 F_{z0} &= \frac{d}{dt} \left(\chi 1 \cdot \frac{\partial T}{\partial V_x} + \chi 2 \cdot \frac{\partial T}{\partial V_y} + \chi 3 \cdot \frac{\partial T}{\partial V_z} \right) \\
 M_x &= \frac{d}{dt} \left\{ \begin{aligned} &(\chi 1 \cdot b - \beta 1 \cdot c) \cdot \frac{\partial T}{\partial V_x} + (\chi 2 \cdot b - \beta 2 \cdot c) \cdot \frac{\partial T}{\partial V_y} + (\chi 3 \cdot b - \beta 3 \cdot c) \cdot \frac{\partial T}{\partial V_z} \\ &+ \alpha 1 \cdot \frac{\partial T}{\partial \omega_x} + \alpha 2 \cdot \frac{\partial T}{\partial \omega_y} + \alpha 3 \cdot \frac{\partial T}{\partial \omega_z} \end{aligned} \right\} \\
 M_y &= \frac{d}{dt} \left\{ \begin{aligned} &(\alpha 1 \cdot c - \chi 1 \cdot a) \cdot \frac{\partial T}{\partial V_x} + (\alpha 2 \cdot c - \chi 2 \cdot a) \cdot \frac{\partial T}{\partial V_y} + (\alpha 3 \cdot c - \chi 3 \cdot a) \cdot \frac{\partial T}{\partial V_z} \\ &+ \beta 1 \cdot \frac{\partial T}{\partial \omega_x} + \beta 2 \cdot \frac{\partial T}{\partial \omega_y} + \beta 3 \cdot \frac{\partial T}{\partial \omega_z} \end{aligned} \right\} \\
 M_z &= \frac{d}{dt} \left\{ \begin{aligned} &(\beta 1 \cdot a - \alpha 1 \cdot b) \cdot \frac{\partial T}{\partial V_x} + (\beta 2 \cdot a - \alpha 2 \cdot b) \cdot \frac{\partial T}{\partial V_y} + (\beta 3 \cdot a - \alpha 3 \cdot b) \cdot \frac{\partial T}{\partial V_z} \\ &+ \chi 1 \cdot \frac{\partial T}{\partial \omega_x} + \chi 2 \cdot \frac{\partial T}{\partial \omega_y} + \chi 3 \cdot \frac{\partial T}{\partial \omega_z} \end{aligned} \right\} \quad \text{Gl. 12}
 \end{aligned}$$

Die Bewegungsgleichungen bezogen auf das schiffsfeste Koordinatensystem lauten:

$$\begin{aligned}
 F_x &= \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial V_x} + \omega_y \frac{\partial T}{\partial V_z} - \omega_z \frac{\partial T}{\partial V_y} \\
 F_y &= \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial V_y} + \omega_z \frac{\partial T}{\partial V_x} - \omega_x \frac{\partial T}{\partial V_z} \\
 F_z &= \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial V_z} + \omega_x \frac{\partial T}{\partial V_y} - \omega_y \frac{\partial T}{\partial V_x} \\
 M_x &= \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \omega_x} - V_z \frac{\partial T}{\partial V_y} + V_y \frac{\partial T}{\partial V_z} - \omega_z \frac{\partial T}{\partial \omega_y} + \omega_y \frac{\partial T}{\partial \omega_z} \\
 M_y &= \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \omega_y} - V_x \frac{\partial T}{\partial V_z} + V_z \frac{\partial T}{\partial V_x} - \omega_x \frac{\partial T}{\partial \omega_z} + \omega_z \frac{\partial T}{\partial \omega_x} \\
 M_z &= \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \omega_z} - V_y \frac{\partial T}{\partial V_x} + V_x \frac{\partial T}{\partial V_y} - \omega_y \frac{\partial T}{\partial \omega_x} + \omega_x \frac{\partial T}{\partial \omega_y}
 \end{aligned} \quad \text{Gl. 13}$$

Bildet man in den schiffsfesten Gleichungen 13 die partiellen Differentiale und setzt sie ein, so folgen die Gleichungen 14

$$\begin{aligned}
 F_X &= m \frac{\partial V_X}{\partial t} + m \cdot \omega_Y \cdot V_Z - m \cdot \omega_Z \cdot V_Y \\
 F_Y &= m \frac{\partial V_Y}{\partial t} + m \cdot \omega_Z \cdot V_X - m \cdot \omega_X \cdot V_Z \\
 F_Z &= m \frac{\partial V_Z}{\partial t} + m \cdot \omega_X \cdot V_Y - m \cdot \omega_Y \cdot V_X \\
 M_X &= I_X \cdot \frac{\partial \omega_X}{\partial t} + I_Z \cdot \omega_Z \cdot \omega_Y - I_Y \cdot \omega_Y \cdot \omega_Z + m \cdot V_Z \cdot V_Y - m \cdot V_Y \cdot V_Z \\
 M_Y &= I_Y \cdot \frac{\partial \omega_Y}{\partial t} + I_X \cdot \omega_X \cdot \omega_Z - I_Z \cdot \omega_Z \cdot \omega_X + m \cdot V_X \cdot V_Z - m \cdot V_Z \cdot V_X \\
 M_Z &= I_Z \cdot \frac{\partial \omega_Z}{\partial t} + I_Y \cdot \omega_Y \cdot \omega_X - I_X \cdot \omega_X \cdot \omega_Y + m \cdot V_Y \cdot V_X - m \cdot V_X \cdot V_Y
 \end{aligned}
 \tag{Gl.14}$$

Stellt man die Gl. 14 in der Vektorschreibweise dar, so folgt:

$$\begin{aligned}
 \vec{F} &= \frac{d\vec{P}}{dt} + \vec{\omega} \times \vec{P} \\
 \vec{M} &= \frac{d\vec{D}}{dt} + \vec{\omega} \times \vec{D} + \vec{V} \times \vec{P}
 \end{aligned}
 \tag{Gl.15}$$

Aufgelöst in ihre Komponenten inkl. hydrodynamischer Massen folgt

$$\begin{aligned}
 F_X &= (m + m_X) \frac{\partial V_X}{\partial t} + (m + m_Z) \cdot \omega_Y \cdot V_Z - (m + m_Y) \cdot \omega_Z \cdot V_Y \\
 F_Y &= (m + m_Y) \frac{\partial V_Y}{\partial t} + (m + m_X) \cdot \omega_Z \cdot V_X - (m + m_Z) \cdot \omega_X \cdot V_Z \\
 F_Z &= (m + m_Z) \frac{\partial V_Z}{\partial t} + (m + m_Y) \cdot \omega_X \cdot V_Y - (m + m_X) \cdot \omega_Y \cdot V_X \\
 M_X &= (I_X + I_{hX}) \cdot \frac{\partial \omega_X}{\partial t} + (I_Z + I_{hZ}) \cdot \omega_Z \cdot \omega_Y - (I_Y + I_{hY}) \cdot \omega_Y \cdot \omega_Z + (m + m_Z) \cdot V_Z \cdot V_Y - \\
 &\quad - (m + m_Y) \cdot V_Y \cdot V_Z \\
 M_Y &= (I_Y + I_{hY}) \cdot \frac{\partial \omega_Y}{\partial t} + (I_X + I_{hX}) \cdot \omega_X \cdot \omega_Z - (I_Z + I_{hZ}) \cdot \omega_Z \cdot \omega_X + (m + m_X) \cdot V_X \cdot V_Z - \\
 &\quad - (m + m_Z) \cdot V_Z \cdot V_X
 \end{aligned}
 \tag{Gl.16}$$

$$M_z = (I_z + I_{hz}) \cdot \frac{\partial \omega_z}{\partial t} + (I_y + I_{hy}) \cdot \omega_y \cdot \omega_x - (I_x + I_{hx}) \cdot \omega_x \cdot \omega_y + (m + m_y) \cdot V_y \cdot V_x - (m + m_x) \cdot V_x \cdot V_y$$

Diese Gleichungen beschreiben die Bewegung eines Körpers in einer allseitig unbegrenzten, inkompressiblen Flüssigkeit.

4.1 Fahrdynamische 1D Modellierung

Für die eindimensionale Modellierung der Bewegung eines Schiffes im Sinne der Aufgabenstellung werden folgende vereinfachende Annahmen getroffen:

- Das Schiff bewegt sich in der Ebene.
- Das Schiff befindet sich auf einer stationären Kreisbahn.
- Es wird nur die Bewegungsgleichung quer zur Bewegung des Schiffes betrachtet.
- Es wird vorausgesetzt, dass die Steuerorgane des Schiffes das notwendige Drehmoment für die Fahrt auf der Kreisbahn erzeugen können.
- Flachwassereffekt und Effekte aufgrund seitlicher Begrenzung des Wassers werden vernachlässigt.
- Das Schiff bewegt sich in einem strömenden Gewässer, wobei nur Strömungsgeschwindigkeiten zugelassen sind, die parallel zur Kursachse verlaufen.

Für die Modellierung werden die schiffsfesten Bewegungsgleichungen (Gl. 16) gewählt und es werden nur die Gleichungen in x- und y-Richtung genutzt.

$$F_x = (m + m_x) \frac{\partial V_x}{\partial t} + (m + m_z) \cdot \omega_y \cdot V_z - (m + m_y) \cdot \omega_z \cdot V_y$$

$$F_y = (m + m_y) \frac{\partial V_y}{\partial t} + (m + m_x) \cdot \omega_z \cdot V_x - (m + m_z) \cdot \omega_x \cdot V_z$$

Da nur Bewegungen in der Ebene, also V_x , V_y und ω_z , zugelassen sind, wird ω_x zu 0 und die Bewegungsgleichungen vereinfachen sich zu:

$$F_x = (m + m_x) \frac{\partial V_x}{\partial t} - (m + m_y) \cdot \omega_z \cdot V_y$$

$$F_y = (m + m_y) \frac{\partial V_y}{\partial t} + (m + m_x) \cdot \omega_z \cdot V_x \tag{Gl.17}$$

4.1.1 Ermittlung der Trägheitskräfte

Wird ein Körper beschleunigt, so muss eine Kraft auf ihn einwirken. Dieser Kraft entgegen wirken Widerstand und Massenträgheit. Bewegt sich der Körper im Wasser, so müssen

zusätzlich Flüssigkeitsteilchen, die bereits genannten hydrodynamischen Massen, beschleunigt werden. Wird der Kontrollraum zur Beschreibung der Bewegungsgleichung entsprechend Bild 18 definiert, werden diese Massen auf der Trägheitsseite der Bewegungsgleichungen berücksichtigt.

Die Größe der hydrodynamischen Massen soll potenzialtheoretisch hergeleitet werden. Dem Wasser wird infolge der Beschleunigung des Schiffkörpers kinetische Energie zugeführt. Hat man eine Geschwindigkeitspotenzialfunktion Φ für die Flüssigkeit, die den Schiffkörper umströmt, so kann die kinetische Energie der Flüssigkeit wie folgt ausgedrückt werden:

$$E_{Fl} = -\frac{\rho}{2} \int_A \phi \cdot \frac{\partial \phi}{\partial n} dA \quad \text{Gl.18}$$

Dabei sind neben der Potenzialfunktion Φ , n die Normale auf der Oberfläche des umströmten Körpers, A die Oberfläche des Körpers und ρ die Dicht der Flüssigkeit. Für die kinetsiche Energie die dem Fluid zugeführt wird gilt:

$$E_{Fl} = \frac{m}{2} \cdot v^2 \quad \text{Gl.19}$$

Nutz man beide Gleichungen ergibt sich die Beziehung für die hydrodynamische Masse.

$$m_h = -\frac{\rho}{v^2} \int_A \phi \cdot \frac{\partial \phi}{\partial n} dA \quad \text{Gl.20}$$

Schiffe bewegen sich an der Wasseroberfläche. Der Einfluss der Wellenbildung soll vernachlässigt werden. Aus diesem Grund wird der Schiffkörper an der Wasseroberfläche gespiegelt, sodass der entstandene Doppelkörper komplett eingetaucht ist und man die doppelte hydrodynamische Masse erhält.

Da für das zu entwickelnde Modell später nur die Bewegungsgleichung in Querrichtung des Schiffes gelöst werden soll, konzentriert sich die Ermittlung der hydrodynamischen Masse entsprechend auf die Querrichtung. Auf Grund seiner Abmessungen kann das Schiff als schlanker Körper betrachtet werden und Effekte aus der räumlichen Umströmung können vernachlässigt werden. Der gespiegelte Schiffkörper wird in Spante zerschnitten und die Umströmung jedes Spantes wird einzeln untersucht. Als Resultat erhält man die hydrodynamische Masse $\tilde{m}_y(x)$ (pro Längeneinheit des Schiffes). Diese längenabhängigen Massen werden über die Schiffslänge integriert und man erhält die gesuchte hydrodynamische Masse für den gesamten Schiffkörper in Querrichtung des Schiffes.

Für die Ermittlung der Potenzialfunktion Φ jedes Spantes wird das Hess-Smith-Panelverfahren genutzt. Bei diesem Verfahren wird die Geometrie des an der

Wasseroberfläche gespiegelten Spantes mit Hilfe von Panels dargestellt (Bild 19). Jeder Panel wird mit einer Quelle belegt.

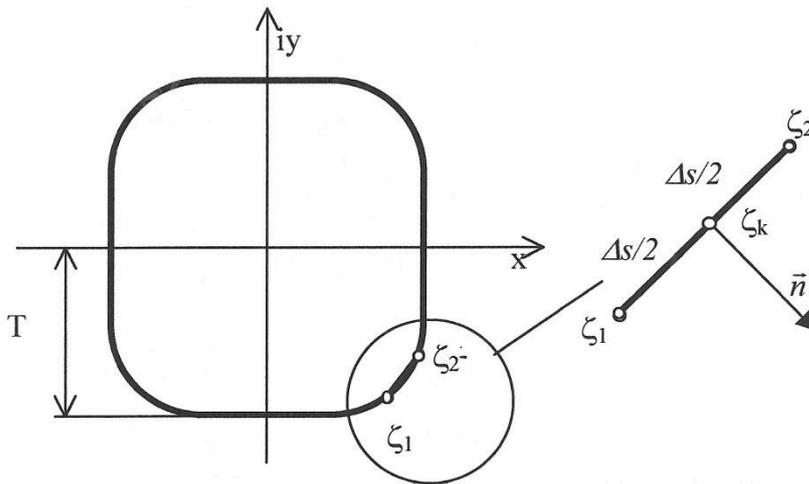


Bild 19: Darstellung der Hess-Smith-Panelmethode

Der gesamte Querschnitt wird durch eine Parallelströmung angeströmt. Die Quellstärken für Panelquellen werden so bestimmt, dass sich die Strömung tangential an die Spantkontur anlegt und kein Wasser durch die Panels in das Innere des Spantes dringen kann (kinematische Randbedingung). Die Integration aller Potentialelemente ergibt die gesuchte Potenzialfunktion.

Eine Punktquelle auf der Spantoberfläche liefert folgenden differentiellen Anteil.

$$d\varphi = \frac{q(P')dS}{4\pi * r(P, P')} \quad \text{Gl.21}$$

Dabei ist $q(P')$ die Quellstärke in dem Punkt P' und $r(P, P')$ der Abstand zur Quelle im Punkt P . Damit liefert die Quelle $q(P') dS$ im Punkt P den Beitrag $d\varphi$. Integriert man alle Quellanteile über die Oberfläche der Spantkontur, folgt

$$\varphi = \frac{1}{4\pi} \oint \frac{q(P')dS}{r(P, P')} \quad \text{Gl.22}$$

Für die weiter Behandlung wird die Strömung in der komplexen ζ -Ebene mit $\zeta = y + iz$ als Strömungsfunktion $F(\zeta)$ beschrieben. Der Realteil dieser Funktion ist die Potenzialfunktion $\varphi(y, z)$. Damit wird der differentielle Anteil einer Punktquelle ζ auf dem Punkt ζ' der Spantoberfläche zu:

$$dF = \frac{1}{2\pi} q(s) \log(\zeta - \zeta') ds \quad \text{Gl.23}$$

s ist dabei die Koordinate längs der Spantkontur S_0 . Die gesamte Strömungsfunktion erhält man durch Integration über die Spantkontur.

$$F(\zeta) = \frac{1}{2\pi} \oint_{S_0} q(s) \log(\zeta - \zeta') ds \quad \text{Gl.24}$$

Aus der Ableitung nach ζ folgt der Geschwindigkeitsvektor v im Punkt ζ .

$$v(\zeta) = \frac{1}{2\pi} \oint_{S_0} \frac{q(s) ds}{\zeta - \zeta'} \quad \text{Gl.25}$$

Für die numerische Berechnung wird nach der Hess-Smith-Methode die Spantkontur in N gerade Panels Δs unterteilt, auf denen die Quellstärke q jeweils konstant ist. Die Krümmung der Spantkontur wird in diesen Panelabschnitten vernachlässigt. Werden alle Potenzialquellen addiert, folgt

$$F(\zeta) = \sum_{k=1}^N \frac{q_k}{2\pi} \int_{\Delta S_k} \log(\zeta - \zeta') ds \quad \text{Gl.26}$$

und

$$v(\zeta) = \sum_{k=1}^N \frac{q_k}{2\pi} \int_{\Delta S_k} \frac{ds}{\zeta - \zeta'} \quad \text{Gl.27}$$

Die Integrale in den vorgenannten Gleichungen sind unabhängig von den bisher unbekanntem Quellstärken. Sie entsprechen dem Wert der Strömungsfunktion bzw. der Geschwindigkeit im Punkt ζ infolge einer Einheitsquellstärke $Q_k = q_k / 2\pi = 1$ auf dem Randstück Δs_k .

Auf jedem Panel wird mittig eine Quelle plaziert. Nun müssen die unbekanntem Quellstärken derart bestimmt werden, dass die eingangs genannte kinematische Randbedingung erfüllt ist. Zu diesem Zweck wird auf jedem Panel ein Einheitsvektor n eingeführt, der senkrecht auf dem Panel steht und von der Spantkontur nach außen zeigt (Bild 19). Unter Nutzung dieses Einheitsvektors kann man schreiben:

$$\Delta F_{jk} = \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} \log(\zeta_j - \zeta') ds \quad \text{Gl.28}$$

und

$$\Delta v_{jk} = \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} \frac{ds}{\zeta_j - \zeta'} \quad \text{Gl.29}$$

wobei

$$\zeta_{1/2} = \zeta_k \mp \frac{in_k \Delta s_k}{2}$$

und

$$d\zeta' = in_k ds$$

Somit ergibt sich letztendlich

$$j = k \quad \Delta F_{jk} = \frac{1}{in_k} \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} \log(\zeta_j - \zeta') d\zeta' \quad \text{Gl.30}$$

$$\Delta F_{jk} = \frac{\Delta s_k}{2} \left(\frac{1}{\xi} \log\left(\frac{1+\xi}{1-\xi}\right) + \log\left(\frac{1-\xi^2}{\xi^2}\right) \right) \quad j \neq k \quad \text{Gl.31}$$

$$\Delta F_{jk} = i \frac{\Delta s_k}{2} \pi \quad j \neq k \quad \text{Gl.32}$$

Analog folgt

$$\Delta v_{jk} = \frac{1}{in_k} \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} \frac{d\zeta'}{\zeta_j - \zeta'} \quad \text{Gl.33}$$

$$\Delta v_{jk} = \frac{1}{in_k} \log\left(\frac{1+\xi}{1-\xi}\right) \quad j \neq k \quad \text{Gl.34}$$

$$\Delta v_{jk} = i \frac{\Delta s_k}{2} \pi \quad j = k \quad \text{Gl.35}$$

Dabei gilt

$$\xi = \frac{in_k \Delta s_k}{2(\zeta_j - \zeta_k)} \quad \text{Gl.36}$$

Für die numerische Behandlung der zu erfüllenden kinetischen Randbedingung wird die Geschwindigkeit Δv_{jk} im Punkt ζ_j in seine Komponenten in Richtung des Normalenvektors (Δv_n) und in seine Richtung tangential zum Panel (Δv_t) aufgeteilt. Es folgt

$$\begin{aligned} \Delta v_n &= \operatorname{Re}\{n_j \Delta v_{jk}\} \\ \Delta v_t &= -\operatorname{Im}\{n_j \Delta v_{jk}\} \end{aligned} \quad \text{Gl.37}$$

Führt man die Winkel zwischen der positiven reellen Achse und den Normalen auf den Panels Θ_k und Θ_j ein, können die Normalen wie folgt angegeben werden.

$$n_k = e^{i\Theta_k} \quad \text{bzw.} \quad n_j = e^{i\Theta_j}$$

Danach ergibt sich die Anströmgeschwindigkeit in Richtung der Normalen der Panels unter Beachtung, dass $Q_k = q_k / 2\pi$ und $A_{jk}^{(N)} = \operatorname{Re}\{n_j \Delta v_{jk}\}$ sind.

$$\begin{aligned} A_{jk}^{(N)} &= \operatorname{Re}\left\{-ie^{i(\Theta_j - \Theta_k)} \log\left(\frac{1 - \xi}{1 + \xi}\right)\right\} & j \neq k \\ A_{jk}^{(N)} &= \pi & j = k \end{aligned}$$

zu

$$\Delta v_n(\zeta_j) = \sum_{k=1}^N A_{jk}^{(N)} Q_k \quad \text{Gl.38}$$

Bewegt sich der Spantquerschnitt in Richtung der reellen Achse mit der Geschwindigkeit U , gilt für die Normalgeschwindigkeit im Punkt ζ_j

$$v_{nj} = U \cdot \cos \Theta_j \quad \text{Gl.39}$$

Unter Nutzung der kinematischen Randbedingung kann nun zur Berechnung der noch unbekannteren Quellstärken folgendes lineare Gleichungssystem aufgestellt werden:

$$\sum_{k=1}^N A_{jk}^{(N)} Q_k = \cos \Theta_j \quad \text{Gl.40}$$

Dies gilt für $j = 1 \dots N$. Das Potenzial an der Stelle ζ_j unter Berücksichtigung aller Singularitäten wird dann wie folgt berechnet:

$$\varphi_j = \sum_{k=1}^N \operatorname{Re}\{\Delta F_{jk}\} \cdot Q_k \quad \text{Gl.41}$$

Die hydrodynamische Masse des Spantquerschnittes ergibt sich zu

$$m_h = \rho \sum_{k=1}^N -\varphi_j \cos(\Theta_j) \cdot \Delta s_j \quad \text{Gl.42}$$

Dabei wurde U gleich 1 gesetzt.

Für die weiteren Betrachtungen wird der Trägheitskoeffizient $c(x)$ nach Lewis /4.3/ genutzt. Mit seiner Hilfe kann die hydrodynamische Masse an jedem Spant wie folgt ausgedrückt werden.

$$m_h(x) = \frac{\rho}{2} \cdot \pi \cdot c(x) \cdot T(x)^2 \quad \text{Gl.43}$$

$T(x)$ ist der örtliche Tiefgang an der Stelle des Spants.

Die bisher angestellten Untersuchungen gelten für die Berechnung der hydrodynamischen Masse in unbeschränktem Wasser. Binnenschiffe fahren im Normalfall in Flachwasser. Diese Beschränkung in der Wassertiefe beeinflusst aber die Größe der hydrodynamischen Masse. Damit dieser Effekt bei der Bestimmung der hydrodynamischen Masse mit berücksichtigt werden kann, muss in der Potenzialfunktion die Flusssohle ergänzt werden.

Dass Schiff wurde bisher in Spantschnitten als Doppelkörper modelliert. Nun müssen ober- und unterhalb der Doppelspanten Begrenzungsebenen eingeführt werden, an denen sich die Strömung parallel zur Ebene bewegt. Der Abstand dieser beiden Ebenen zueinander entspricht der doppelten Wassertiefe $2H$. Potenzialtheoretisch werden solche Ebenen eingeführt, indem die Potenzialfunktion an den Ebenen gespiegelt wird. Um keine Störeffekte infolge Asymmetrie in der neuen Gesamtfunktion zu erhalten, erfolgt diese Spiegelung in beiden Richtungen unendlich oft. In dem vorliegenden Fall bedeutet das, dass die gewonnene Potenzialfunktion in z-Richtung mit der Periode $2H$ gespiegelt wird. Der Betrag der Quelle $q(s)ds$ im Punkt ζ' auf den Rand des Spantes und dessen Spiegelbilder bei $\zeta' \pm n \cdot H_i$, wobei $n = 1 \dots \infty$ ist, ist dann

$$dF(\zeta) = \left[\sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{q(s)}{2\pi} \log(\zeta - \zeta' + 2 \cdot n \cdot H_i) \right] ds \quad \text{Gl.44}$$

$$dF(\zeta) = \frac{q(s)}{2\pi} \log \left[\left(\zeta - \zeta' \prod_{n=1}^{\infty} \left((\zeta - \zeta')^2 - (2 \cdot n \cdot H_i)^2 \right) \right) ds \right]$$

Es gilt

$$\sin(\pi \cdot x) = \pi \cdot x \prod_{n=1}^{\infty} \left(1 - \frac{x^2}{n^2} \right) \quad \text{Gl.45}$$

Nun kann die Strömungsfunktion wie folgt ausgedrückt werden:

$$dF(\zeta) = \frac{q(s)}{2\pi} \log \left[\sin \left(\frac{\pi}{2 \cdot H_i} (\zeta - \zeta') \right) \right] ds \quad \text{Gl.46}$$

Durch Integration über den Rand des Spants folgt:

$$F(\zeta) = \frac{1}{2\pi} \int_{s_0} q(s) \log \left[\sin \left(\frac{\pi}{2 \cdot H_i} (\zeta - \zeta') \right) \right] ds \quad \text{Gl.47}$$

Durch Differentiation nach ζ folgt die Geschwindigkeit:

$$v(\zeta) = \frac{1}{2\pi} \int_{s_0} q(s) \frac{\pi}{2 \cdot H_i} \cot \left(\frac{\pi}{2 \cdot H_i} (\zeta - \zeta') \right) ds \quad \text{Gl.48}$$

Analog zu den Abhandlungen für Tiefwasser kann man schreiben:

$$\Delta v_{jk} = \frac{1}{i \cdot n_k} \log \left(\frac{\sin(\zeta(1+\xi))}{\sin(\zeta(1-\xi))} \right) \quad \text{Gl.49}$$

wobei gilt:

$$\zeta = \frac{\pi}{2 \cdot H_i} (\zeta_j - \zeta_k) \quad \text{Gl.50}$$

Diese Gleichung wird in $A_{jk}^{(N)}$ (Gl. 40) eingesetzt, um die Koeffizienten für das lineare Gleichungssystem zu bestimmen. Nach der Lösung des Gleichungssystems wird die gewonnene Quellenverteilung in

$$\varphi_j = \sum_{k=1}^N \text{Re} \{ \Delta F_{jk} \} \cdot Q_k \quad \text{Gl.51}$$

eingesetzt und letztendlich analog zum Tiefwasser die hydrodynamische Masse für den Spantquerschnitt im Flachwasser berechnet.

Die hydrodynamischen Massen in Längsrichtung des Schiffes sind im Verhältnis zur Schiffsmasse klein und werden deshalb abgeschätzt. In der Literatur findet man Angaben, die zwischen 2 bis 5 % der Schiffsmasse liegen. Da es sich bei Binnenschiffen um sehr völlige Schiffe handelt, liegen die realen Werte mehr bei 5 %. Wegen des geringen Einflusses dieser hydrodynamischen Massen auf das Ergebnis der Berechnung zum Verkehrsflächenbedarf kann die Nutzung eines Schätzwertes als ausreichend angesehen werden.

4.1.2 Berechnung der Fliehkräfte

Die weiteren Untersuchungen zur Ermittlung der Fliehkräfte basieren auf den schiffsfesten Bewegungsgleichungen. Sie sind auf ein schiffsfestes Koordinatensystem bezogen, dessen x-Achse auf der Mittschiffsebene liegt. Die positive y-Achse weist in die Innenkurve. Der Koordinatenursprung befindet sich in der Schiffsmitte (Bild 20).

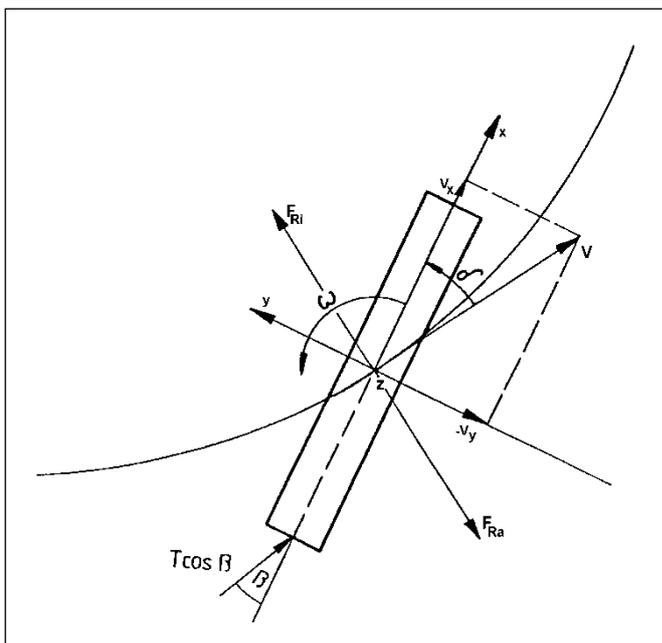


Bild 20: Definition des schiffsfesten Koordinatensystems

Wie in Kapitel 4 beschrieben, werden für die weiteren Untersuchungen nur Bewegungsgleichungen in x- und y-Richtung benutzt. Weiterhin wird ab jetzt unterschieden, ob die Bewegung gegen Grund oder gegen Wasser betrachtet wird und die Komponenten entsprechend mit g oder w gekennzeichnet werden. Da es sich hier um die Ermittlung der Fliehkräfte handelt, sind Geschwindigkeiten gegen Grund gemeint. So folgen aus Gl. 17 die nachstehenden Gleichungen.

$$F_x(t) = (m + m_x) \cdot \frac{d}{dt} V_{xg}(t) - (m + m_y) \cdot V_{yg}(t) \cdot \omega_z$$

$$F_y(t) = (m + m_y) \cdot \frac{d}{dt} V_{yg}(t) + (m + m_x) \cdot V_{xg}(t) \cdot \omega_z$$

Die Kraftkomponenten der x- und y-Richtung werden auf den tangentialen und radialen Anteil zur Bahn aufgeteilt. Für das aufzustellende Modell wird dann nur der radiale Kraftanteil betrachtet.

$$F_{ra}(t) = -F_x \cdot \sin(\delta(t)) - F_y \cdot \cos(\delta(t)) \quad \text{Gl.52}$$

Setzt man voraus, dass sich in der Kurvenfahrt die Geschwindigkeit und der Driftwinkel nicht ändern, werden ihre Ableitungen nach der Zeit zu 0. Wird darüber hinaus die dimensionslose Bahnkrümmung Ω eingeführt, kann die Differentialgleichung wie folgt vereinfacht werden.

$$F_{ra}(t) = -\Omega \cdot \frac{V_g(t)^2}{L} \cdot (m + \sin(\delta(t))^2 \cdot m_y + \cos(\delta(t))^2 \cdot m_x) \quad \text{Gl.53}$$

Dabei ist:

$$\Omega = \frac{\omega_z}{V_g(t)} \cdot L \quad \text{Gl.54}$$

L ist die Schiffslänge /4.4/.

4.1.3 Berechnung der hydraulischen Kräfte infolge Schräganströmung

Bei der gesteuerten Bewegung erzeugt der Schiffsführer mit Hilfe gezielter Rudermanöver am Heck eine Querkraft. Infolge dieser Kraft dreht sich der Schiffskörper. Durch die Überlagerung der Fortschrittsgeschwindigkeit und der Drehung wird der Schiffskörper durch das Wasser schräg angeströmt. Diese Schräganströmung erzeugt eine Querkraft, die bei Einhaltung der Gleichgewichtsbedingung das Schiff auf einer Kreisbahn fahren lässt.

Für die Berechnung der hydraulischen Querkräfte wird eine Impulsanalyse am Schiffskörper /4.4/ vorgenommen. Hierbei wird die Anströmgeschwindigkeit tangential zur Bewegungsrichtung in ihre Komponenten längs und quer zur Schiffslängsachse zerlegt. Weiterhin wird angenommen, dass die Wassermasse, die quer auf den Schiffskörper trifft, vom Schiffskörper umgeleitet wird. Infolge der zeitlichen Änderung des Impulses des Fluids innerhalb einer Kontrollebene mit der differentiellen Breite dx (Bild 21) entsteht eine örtliche Querkraft am Schiffskörper.

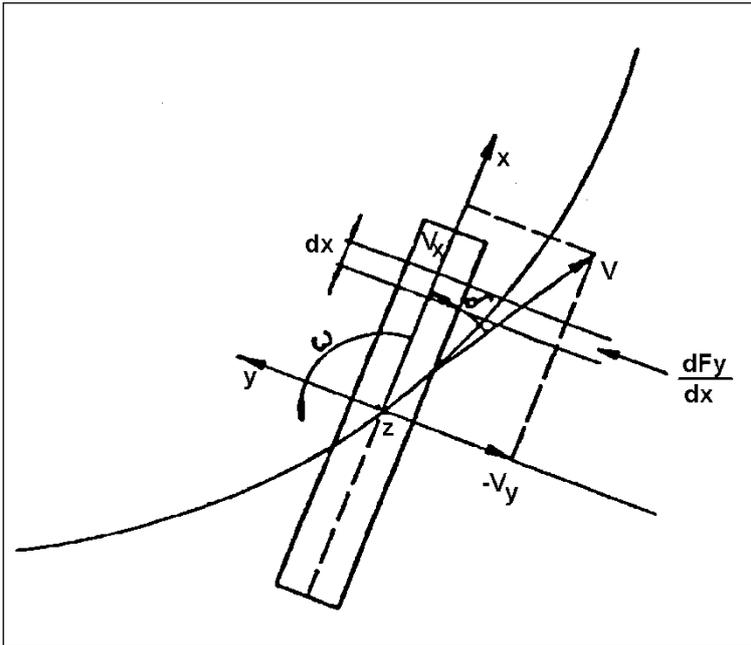


Bild 21: Hydrodynamische Kräfte in der Kontrollebene dx

Die y-Komponente des hydrodynamischen Impulses in der Kontrollebene, der durch die Schiffsgeschwindigkeit relativ zum Wasser (V_w) ausgelöst wird, ist:

$$dI_{Fl} = \tilde{m}_y(x) \cdot V_w(t) \cdot \sin(\delta(x)) dx \quad \text{Gl.55}$$

Der von der Position längs der Schiffsachse abhängige Driftwinkel $\delta(x)$ wird in einen zeitabhängigen Driftwinkel überführt, indem die Fortschrittsgeschwindigkeit $V(t) \cdot \sin(\delta(t))$ und die Queranströmung aus der Drehung um die z-Achse $-\omega_z \cdot x$ überlagert werden. Es folgt:

$$\sin(\delta(x)) = \sin(\delta(t)) - \frac{x}{R} \quad \text{Gl.56}$$

Durch die zeitliche Änderung des Impulses innerhalb des Kontrollabschnittes folgt bei stationärer Kreisfahrt eine örtliche Querkraft. Für die Beschreibung der hydrodynamischen Masse wird in diesem Term der Lewiskoeffizient $c(x)$ entsprechend Gl.43 verwendet.

$$dF_y(x) = d\left(\frac{\rho}{2} \cdot \pi \cdot c(x) \cdot T(x)^2 \cdot V_w(t) \cdot \left(\sin(\delta(t)) - \frac{x}{R}\right)\right) \frac{dx}{dt} \quad \text{Gl.57}$$

Hierbei ist dx/dt die Geschwindigkeit gegen Wasser, die die hydraulischen Querkräfte verursacht. Dieser Ansatz gilt nur für kleine Driftwinkel. Bei größeren Winkeln kommt es im Bereich des Hecks zu Wirbelbildungen und die Umströmung des Schiffskörpers entfernt sich

immer mehr von der Annahme der parallelen Umströmung der Spanten. Nach /4.4/ muss deshalb ein zusätzlicher Anteil berücksichtigt werden:

$$\operatorname{sgn}(\delta(t)) \cdot C_{ws} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot (V_w(t) \cdot \sin(\delta(t)))^2 \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} T(x) dx \quad \text{Gl.58}$$

Durch Integration über die Schiffslänge und Einführung der dimensionslosen Bahnkrümmung Ω kann die Größe der hydraulischen Querkraft letztendlich nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$F_y(t) = \left[I_1 \cdot \cos(\delta(t)) \cdot \sin(\delta(t)) - I_2 \cdot \cos(\delta(t)) \cdot \frac{\Omega}{L} - I_3 \cdot \frac{\Omega}{L} \cdot \cos(\delta(t)) + \frac{C_{ws}}{\pi} \cdot I_4 \right] \frac{\rho}{2} \cdot \pi \cdot V_w(t)^2 \quad \text{Gl.59}$$

I_1 bis I_4 stehen in dieser Gleichung für folgende Integrale:

$$I_1 = \int_0^{\frac{L}{2}} \left(\frac{d}{dx} c(x) \cdot T(x)^2 \right) dx$$

$$I_2 = \int_0^{\frac{L}{2}} \left(\frac{d}{dx} c(x) \cdot T(x)^2 \right) \cdot x dx$$

$$I_3 = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} c(x) \cdot T(x)^2 dx$$

$$I_4 = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} T(x) \cdot \left(\sin(\delta(t)) - \frac{\Omega \cdot x}{L} \right)^2 dx$$

Für die Integrale I_1 und I_2 erfolgt die Integration nur über $L/2$, da die Impulsumlenkung, die aus der Änderung der Querschnittskomponenten resultiert, im Heckbereich infolge Strömungsablösung nicht stattfindet.

4.1.4 Berechnung der Position des taktischen Drehpunktes

Bei der Fahrt auf dem stationären Drehkreis stehen die Fliehkräfte und der radiale Anteil der Querkraften infolge der Schräganströmung im Gleichgewicht, d.h.:

$$0 = F_{ra}(t) + F_y(t) \cdot \cos(\delta(t)) \quad \text{Gl.60}$$

Die in dem Ausdruck für die Fliehkräfte enthaltenen hydrodynamischen Massen können ebenfalls mit Hilfe der Lewiskoeffizienten berechnet werden. Dabei wird der Einfluss der räumlichen Umströmung durch Korrekturfaktoren nach Munk (R_1 und R_2) berücksichtigt /4.4/. Es folgt für m_x und m_y eines an der Wasserspiegelebene gespiegelten Doppelkörpers:

$$m_{yd} = R_2 \cdot \rho \cdot \pi \cdot \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} c(x) \cdot T(x)^2 dx \quad m_{xd} = R_1 \cdot \rho \cdot \pi \cdot \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} c(x) \cdot T(x)^2 dx \quad \text{Gl.62}$$

Die in diesen Gleichungen enthaltenen Integrale sind bereits als I_3 formuliert worden. Da die Untersuchungen nur für die Fahrt auf dem stationären Drehkreis gelten, kann die Abhängigkeit von der Zeit unberücksichtigt bleiben. Aus der Kinematik der Kreisbewegung folgt weiterhin:

$$\Omega = \frac{L}{R}$$

Damit erhält man nach Auflösung der Gleichung den funktionalen Zusammenhang zwischen dem Bahnradius R und dem Driftwinkel δ :

$$R(\delta) = \frac{2V_g^2 \left[m + \rho \cdot \pi \cdot I_3 \cdot (\sin(\delta)^2 \cdot R_2 + \cos(\delta)^2 \cdot R_1) \right] + V_w^2 \cdot \rho \cdot \pi \cdot \cos(\delta)^2 \cdot (I_2 + I_3)}{[\cos(\delta) \cdot \sin(\delta) \cdot \pi \cdot I_1 + C_{ws} \cdot I_4] \cdot \rho \cdot \cos(\delta) \cdot V_w^2} \quad \text{Gl.63}$$

In dieser Funktion sind folgende Abhängigkeiten berücksichtigt:

- Durch die Unterscheidung der Geschwindigkeit gegen Grund (V_g) und gegen Wasser (V_w) wird der Einfluss der Fließgeschwindigkeit sowohl in der Bergfahrt als auch in der Talfahrt erfasst.
- Der Beiwert C_{ws} berücksichtigt die Kräfte infolge Ablösungserscheinungen am Heck bei der Fahrt mit großen Driftwinkeln. In der Literatur existieren hinsichtlich seiner Größe nur wenige Erfahrungswerte von Seeschiffen. Für die Zwecke der Binnenschifffahrt muss seine Größe durch Naturuntersuchungen ermittelt werden.
- Die Integrale I_1 bis I_4 bestehen hauptsächlich aus dem cT - Verlauf des Schiffskörpers. Dabei ist $T(x)$ der örtliche Tiefgang an der Stelle x und $c(x)$ der zugehörige Lewiskoeffizient. Durch das Integral über die Schiffslänge gehen damit die Hauptabmessungen (Länge L und Tiefgang T) des Schiffes in die Funktion ein. Der Einfluss der Breite wird indirekt mit Hilfe der Trägheitskoeffizienten nach Lewis berücksichtigt. Diese beinhalten darüber hinaus die örtliche Spantform und sind für gebräuchliche Spantformen vorhanden bzw. können entsprechend Kapitel 4.1.1 potenzialtheore-

tisch errechnet werden. Nach der Integration findet somit die Form des Schiffskörpers als Einflussparameter über die Formintegrale in der Berechnung ihren Eingang.

Wie bereits dargelegt, ist die in der Proberechnung genutzte Größe für den Abströmbeiwert C_{ws} ein Mittelwert aus der Seeschifffahrt. Für Binnenschiffe existieren in der Literatur keine verwendbaren Erfahrungen. Deshalb wurden für die Bemessungszwecke aus den Messungen zur Position des taktischen Drehpunktes bei der Fahrt auf Kanälen C_{ws} -Werte abgeleitet und auf die fließenden Gewässer übertragen. Dies ist möglich, da der C_{ws} -Wert im Wesentlichen von der Form des Hinterschiffes abhängt. Unter Nutzung dieser Abströmbeiwerte wurde ein Großmotorgüterschiff modelliert und die im Bild 22 dargestellten Abhängigkeiten für den C_f -Wert in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeiten des Gewässers und der Fahrgeschwindigkeit des Schiffes gegen Wasser errechnet.

In dem Diagramm ist die Strömungsgeschwindigkeit des Flusses als V_{str} an der Abszisse abgetragen. Die Bergfahrt des Schiffes ist dabei mit positiven Vorzeichen gekennzeichnet, die Talfahrt mit einem negativen Vorzeichen. An der Ordinate ist die Größe des C_f -Wertes als dimensionslose Größe abgetragen. Der Wert 0 bedeutet, dass sich der taktische Drehpunkt im Heck des Schiffes befindet. Bei dem Wert 1 befindet er sich im Bug des Schiffes. Ist der Wert größer als 1, befindet sich der taktische Drehpunkt vor dem Schiff. Nach den theoretischen Vorbetrachtungen ist die Größe des C_f -Wertes von der Strömungsgeschwindigkeit des Gewässers und von der Fahrgeschwindigkeit des Schiffes gegen Wasser abhängig. Deshalb wurde für jede untersuchte Fahrgeschwindigkeit eine eigene Funktion errechnet und deren Graphen mit verschiedenen Farben gekennzeichnet. Die Zuordnung der Farben zu den jeweiligen Schiffsgeschwindigkeiten gegen Wasser befindet sich in der Legende des Diagramms.

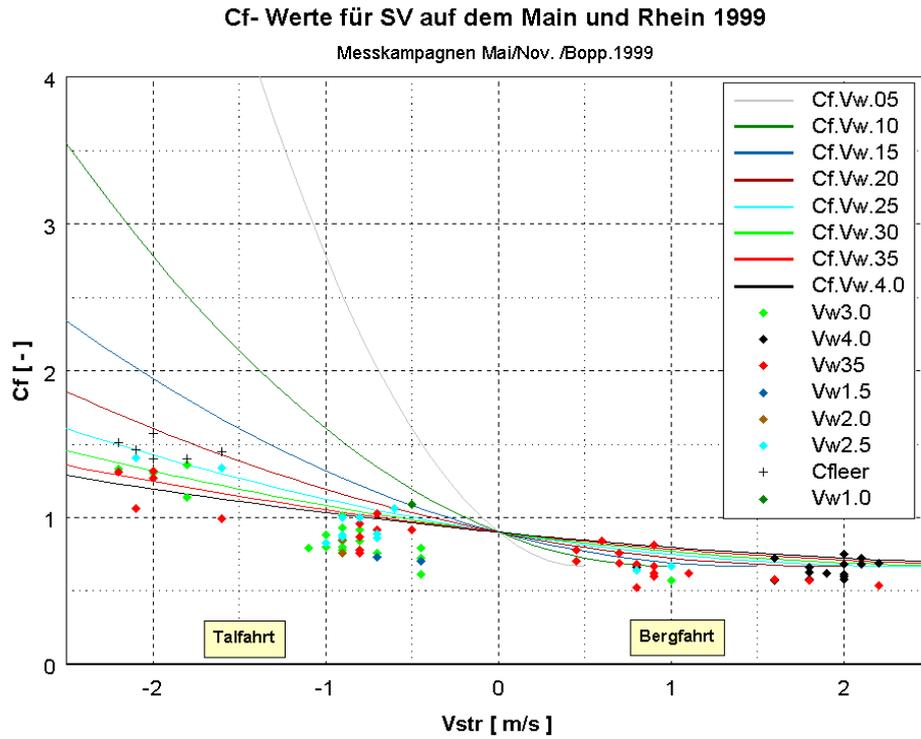


Bild 22: Cf- Werte berechnet und gemessen für SV

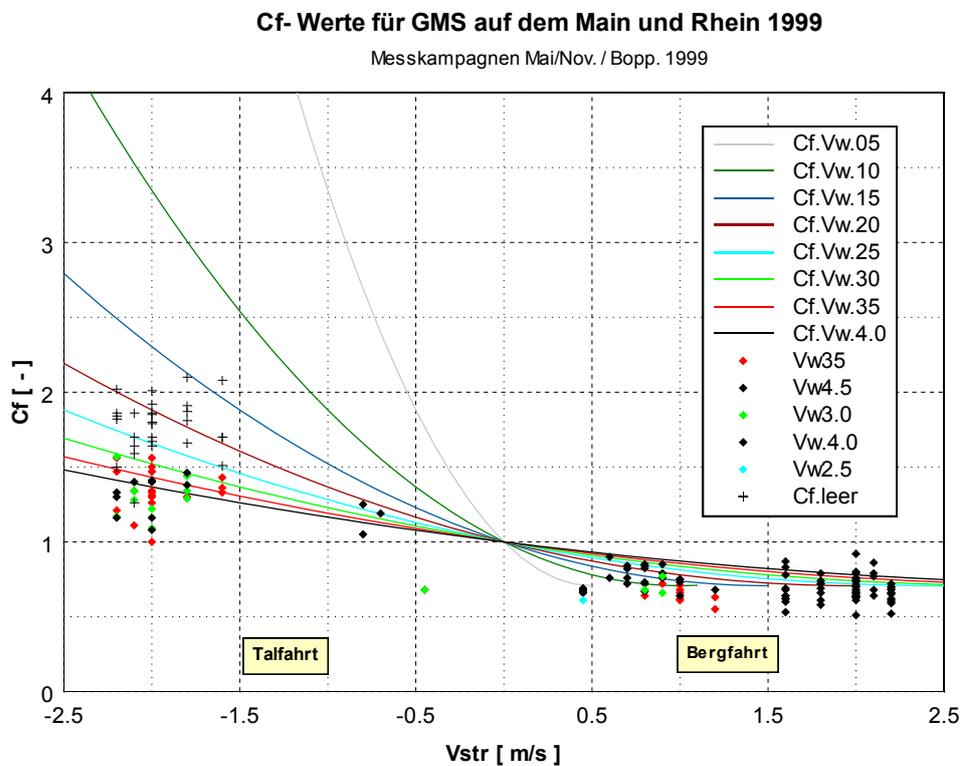


Bild 23: Cf-Werte gemessen und gerechnet für GMS

Zusammengefasst ergeben die Betrachtungen folgende Ergebnisse:

- Die Position des taktischen Drehpunktes ist unabhängig von dem gefahrenen Kurvenradius R für $R > L$.
- Die Fließgeschwindigkeit des Gewässers beeinflusst die Position des taktischen Drehpunktes und damit die Fahrspurbreite des Schiffes. Bei der Bergfahrt verschiebt sich seine Position in Richtung Schiffsmitte, wodurch sich die Fahrspurbreite geringfügig verringert. Bei der Talfahrt wandert der Punkt in Richtung Bug bzw. vor den Bug, wodurch sich die Fahrspurbreite vergrößert.
- Die Fahrgeschwindigkeit des Schiffes gegen Wasser verändert die Größe des Einflusses der Fließgeschwindigkeit auf die Position des taktischen Drehpunktes. Eine Vergrößerung der Fahrgeschwindigkeit führt in der Bergfahrt zu einer geringfügigen Erhöhung der Fahrspurbreite und in der Talfahrt zu einer Verminderung der Fahrspurbreite.

4.2 Fahrdynamische 2D Modellierung

In dem beschriebenen eindimensionalen fahrdynamischen Modell werden die am Schiffskörper wirkenden hydraulischen Kräfte mit der Impulsmethode bestimmt. Dazu werden spantweise die hydrodynamischen Massen mit der Hess-Smith-Methode berechnet. Im Anschluss werden diese über die Schiffslänge im Preprozessing zu einer Gesamtmasse integriert. Diese findet man in den Formintergralen I1 bis I4. Bei den eigentlichen fahrdynamischen Untersuchungen werden aus den Massen im Zusammenhang mit der gemittelten Anströmgeschwindigkeit, die sich aus der Fahrgeschwindigkeit des Schiffes über Grund und der Strömungsgeschwindigkeit und Richtung des Gewässers zusammensetzt, die hydraulischen Impulse am Schiffskörper bestimmt. Aus deren zeitlichen Änderungen folgen die hydraulischen Querkräfte. Letztendlich wird die Bewegungsgleichung in Querrichtung des Schiffes gelöst.

Grundsätzlich ist diese Vorgehensweise auch geeignet, ein zweidimensionales fahrdynamisches Modell zu entwickeln, indem alle 3 Gleichungen, die die Bewegung des Schiffes in der Ebene beschreiben, gelöst werden. Um zum Beispiel die Bewegungsgleichung für das Drehmoment um die Hochachse zu lösen, benötigt man die Querkraftverteilung in Längsrichtung des Schiffskörpers. Diese erhält man, wenn man die Formintegrale nicht im Preprozessing löst, sondern während der Laufzeit des Programmes unter Berücksichtigung der örtlichen Strömungsverhältnisse und der örtlichen Wassertiefen. Mit der Entwicklung dieses Verfahrens „Pegelabhängige Trassierung (PeTra) 2D“ zur Beurteilung der nautischen Verhältnisse in einem zweidimensionalen tiefengemittelten Strömungsfeld wurde die Universität Rostock, Lehrstuhl für Meerestechnik, beauftragt. Diese Aufgabe wurde im Rahmen einer Dissertation erfüllt. Die Dissertation befindet sich in Anlage 1 dieses Forschungsberichtes.

In diesem Verfahren werden mit Hilfe der Impulsmethode die hydraulischen Kräfte bestimmt, die infolge der Eigenbewegung des Schiffes und der Strömung des Gewässers auf den Schiffskörper wirken. Diese Kräfte gehen in die Bewegungsgleichungen ein, die die Bewegung quer zum Schiffskörper und die Drehung um die Hochachse beschreiben. Für den Längswiderstand ist derzeit eine Näherungsgleichung implementiert. Darüber hinaus gehen Schubkräfte, die mit Hilfe einer Propellerdrehzahl vorgegeben werden, und Ruderkräfte, die direkt eingegeben werden, mit als äußere Kräfte in die Bewegungsgleichungen ein. Optional kann ein Bugstrahlruder implementiert werden. Mit Hilfe dieser äußeren Kräfte wird das Schiff gesteuert /4.6/.

Seinerzeit war die Wechselwirkung Schiff/Wasserstraße nicht modelliert. Darüber hinaus existierte nur ein validierter Datensatz für ein 2,80 m abgeladenes GMS (L =110 m, B = 11,45 m). Wegen dieser vereinfachenden Annahmen wurde das Verfahren nur für vergleichende Untersuchungen verwendet, indem die Parameter der einzelnen Varianten mit dem Ausgangszustand verglichen wurden.

Es gab zwei Modi zur Steuerung des Schiffes. Einerseits war es möglich, das Schiff nach Sicht in einem 3D-Sichtmodell zu steuern, indem jederzeit die Ruderkräfte, die Propellerdrehzahl und damit der Schub und bei Bedarf die Bugstrahlruderkräfte variiert werden konnten. Dies erlaubte ein sehr dynamisches Fahren. Allerdings sind die Ergebnisse aus diesen Simulationsfahrten durch die Fähigkeiten des Bedieners stark subjektiv überprägt. Alternativ konnte ein Bahnregler eingesetzt werden, der das Schiff entlang einer vorgegebenen Kursachse steuert. Nachteilig bei dieser Methode war, dass während der Fahrt kein Bugstrahlruder eingesetzt werden konnte und eine Veränderung der Propellerdrehzahl nicht möglich war. Vorteilhaft ist, dass die Berechnungsergebnisse für die verschiedenen Ausbauplanvarianten nicht subjektiv überprägt wurden und somit untereinander vergleichbar waren.

5 Virtuelle Navigation

In dem eingangs genannten Verfahren TRASSE werden für die Bestimmung des Verkehrsflächenbedarfs von Binnenschiffen Kursachsen vorgegeben. Dies ist in künstlichen Wasserstraßen, deren Bau geplant wird, und in nicht bzw. schwach fließenden Wasserstraßen möglich. Die einzelnen Arbeitsschritte der Trassierung und Planung der Fahrrinne sollen am Beispiel der Flusshavel erläutert werden. Notwendige Eingangsdaten sind die Digitale Bundeswasserstraßenkarte (DBWK), ein digitales Geländemodell (DGM) des Ausgangszustandes des Flussbettes mit den zugehörigen Uferanschlüssen und die Abmessungen der Bemessungsschiffe nebst den zugehörigen Cf-Werten.

Im ersten Bearbeitungsschritt werden die Kursachsen konstruiert, auf denen die Bemessungsschiffe entlang „fahren“ sollen (Bild 24). Da es sich bei der Anwendung von TRASSE in

der Regel um die Planung einer künstlichen Wasserstraße geht, können die Kursachsen vorgegeben werden, indem sie unter Berücksichtigung der örtlichen Randbedingungen konstruiert werden.



Bild 24: Erster Trassierungsschritt: Konstruktion der Kursachsen

Bei der Konstruktion der Kursachsen muss sichergestellt sein, dass die Achsen entsprechend der Richtlinie für Regelquerschnitte von Schifffahrtskanälen ausschließlich aus Geraden und Kreisbögen bestehen, die sich abwechseln und tangential ineinander übergehen. Diese Randbedingungen sind notwendig, damit die fahrdynamischen Eigenschaften der Binnenschiffe trotz der starken Vereinfachung des Rechenmodells erhalten bleiben.

Bei der Konstruktion der Achsen ist zu berücksichtigen, dass deren Entfernung zum rechten Ufer groß genug ist, um die vorgeschriebenen Sicherheitsabstände zwischen Schleppkurve des Bemessungsschiffes und Ufer zu garantieren. Darüber hinaus müssen die Kursachsen des Tal- und des Bergfahrers weit genug voneinander entfernt sein, damit auch zwischen

den Schleppkurven beider Schiffe der geforderte Sicherheitsabstand eingehalten wird. Sind die Kursachsen fertiggestellt, werden die Schleppkurven errechnet.



Bild 25: Zweiter Schritt: Positionierung der Schiffssymbole

In Bild 25 ist die Begegnung zweier 185 m langer Schubverbände dargestellt. Der blaue Schubverband fährt zu Tal und der rote Schubverband zu Berg. Werden nach dem Erzeugen der Schleppkurven Bereiche erkannt, in denen die Zielstellung des Ausbaus bzw. die angestrebten Abstände zwischen den Schiffen oder zu den Ufern nicht eingehalten sind, müssen die Kursachsen entsprechend manipuliert werden. Die Manipulation der Kursachsen wird so lange durchgeführt, bis die angestrebten Sicherheitsabstände eingehalten oder notwendige Ufereingriffe minimiert worden sind. Erfüllen die Schleppkurven alle Anforderungen, werden die Fahrspurbreiten ermittelt.

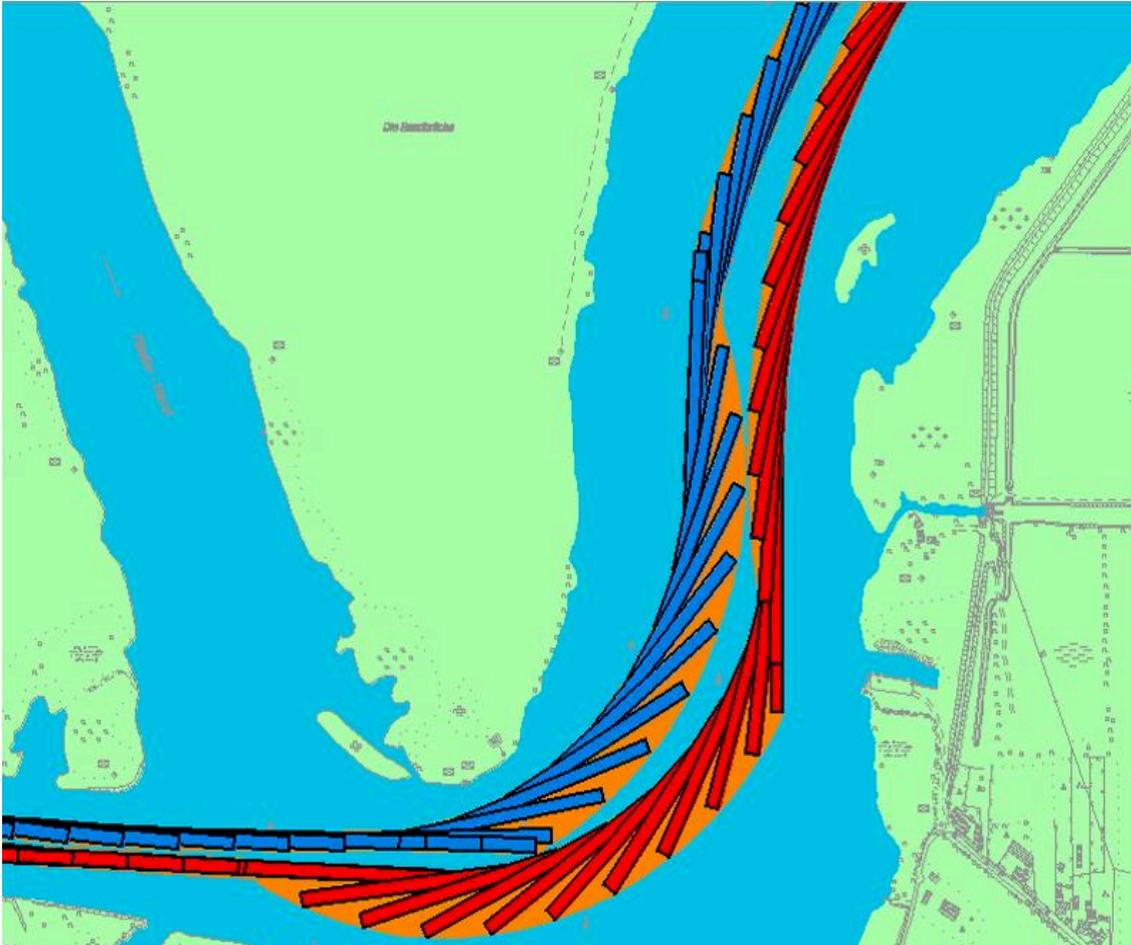


Bild 26: Dritter Schritt: Generierung der Hüllkurven

In Bild 26 ist eine Begegnung zweier Schubverbände im Bereich des Deetzer Knies dargestellt. Durch die Konstruktion der Hüllkurven um die Schleppkurven der Schiffssymbole entstehen Flächen, die der jeweiligen Fahrspur des Schiffes entsprechen.

In natürlichen Wasserstraßen mit starken Strömungsgeschwindigkeiten müssen die Schiffsführer auf die Strömung und die morphologischen Eigenschaften des Flusses reagieren. Dadurch ist es nicht mehr möglich, die Kursachse durch die beschriebene Konstruktionsweise vorzugeben. Ziel der Untersuchungen ist es, ein Verfahren zu entwickeln, welches die Kursachsen unter Berücksichtigung der durch das Fließgewässer vorgegeben Randbedingung automatisch konstruiert.

5.1 Fahrdynamische Bewertung mit Befahrbarkeitspotenzialen

Um die Befahrbarkeit eines vorhandenen Fließgewässers beurteilen zu können, muss man im ersten Schritt die Bereiche heraussuchen, die tief genug sind, damit das Schiff dort fahren kann. Am Beispiel des Querprofils am Rhein bei km 551,3 am Jungferngrund soll erläutert werden, wie die Beurteilung erfolgt. Gefordert wird eine Mindesttiefe, von 1,90 m. In dem unteren Teil von Bild 27 ist das Querprofil dargestellt. Die rote Linie markiert die geforderte Mindestwassertiefe. Daraus wird der Teil des Flusses ersichtlich, der für das vorgegebene Bemessungsschiff mit dem entsprechend Tiefgang grundsätzlich befahrbar ist. In einem weiteren Schritt muss ein Verfahren entwickelt werden, welches es ermöglicht, den befahrbaren Teil der Wasserstraße hinsichtlich der Befahrbarkeit zu bewerten. Dazu werden die Wassertiefen in Befahrbarkeitspotenziale umgewandelt. Zu diesem Zweck werden die Tiefen auf Werte zwischen 0 und 100 normiert. Wassertiefen unter der geforderten Mindesttiefe, im Beispiel unter 1,90 m, erhalten den Potenzialwert 0. Wassertiefen mit der geforderten Mindesttiefe erhalten den Wert 1 und die maximale Tiefe bekommt den Wert 100. Die Umrechnung der Zwischenwerte erfolgt linear. Danach ergibt sich aus dem Querprofil das in Bild 27 im oberen Teil dargestellte Tiefenpotenzial.

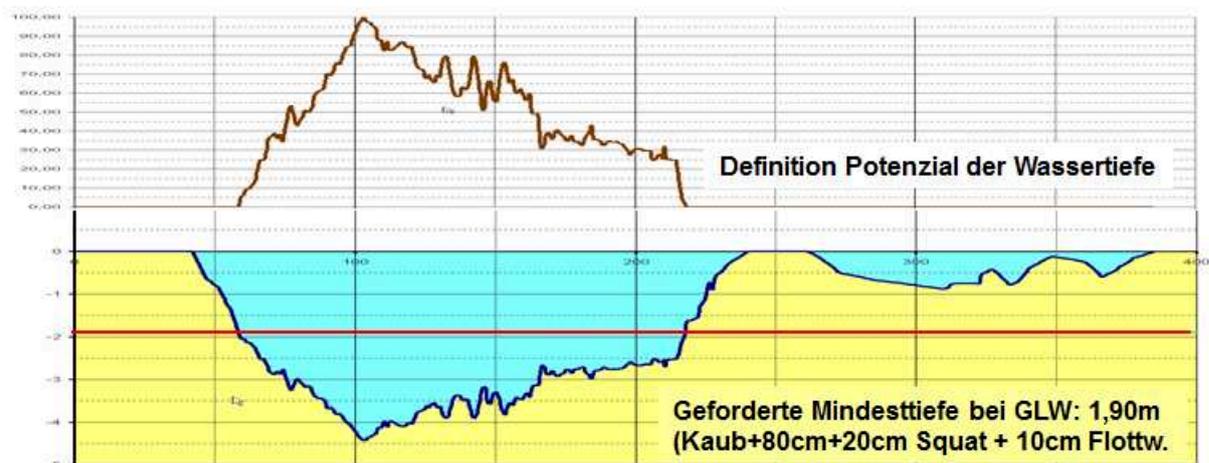


Bild 27: Definition eines Tiefenpotenzials im Flussprofil

Mit Hilfe dieses Potenzials kann die Befahrbarkeit eines Querprofils bewertet werden. Bereiche mit dem Wert 0 sind nicht befahrbar. Mit wachsender Wassertiefe wird der Schiffswiderstand kleiner. Das bedeutet, je größer der Wert des Tiefenpotenzials ist, umso besser ist das Profil in diesem Bereich befahrbar.

Nach dem gleichen Prinzip wird die Fließgeschwindigkeitsverteilung innerhalb des Flussprofils bewertet. Allerdings wird hier unterschieden, ob das Schiff zu Berg oder zu Tal fährt. Auch hier werden die Fließgeschwindigkeiten in Potenzialwerte zwischen 1 und 100 linear umgerechnet. Der Wert 0 wird an Fließgeschwindigkeiten vergeben, die so groß sind, dass

das Schiff diesen Bereich des Profils nicht befahren kann. Fährt das Schiff zu Berg, so wird es immer die Strömungsbereiche meiden, in dem es gegen hohe Fließgeschwindigkeiten anfahren muss. Aus diesem Grund erhalten die maximalen Fließgeschwindigkeiten für den Bergfahrer den Wert 1 und die minimalen Fließgeschwindigkeiten den Wert 100. Für den Talfahrer erfolgt die Bewertung genau umgekehrt. Maximale Fließgeschwindigkeiten bekommen den Wert 100 zugewiesen und die minimalen Fließgeschwindigkeiten den Wert 1.

Allgemein gilt: Ein Potenzial ist die Bewertung des Befahrbarkeitszustands eines Profilstreifens hinsichtlich eines Parameters auf einer Skala von 0 bis 100. Dazu werden zunächst die minimale und die maximale Größe des Parameters auf dem gesamten Profilschnitt ermittelt. Sofern ein großer Parameterwert als optimal angesehen wird, entspricht das Maximum einem Potenzial von 100. Andernfalls wird dem größten Parameterwert das kleinste Potenzial 1 zugeordnet. Nur dann, wenn ein Profilbereich bei Überschreitung eines Parameterwertes als nicht befahrbar gelten soll, wird das Potentialminimum 0 verwendet. Das trifft z.B. für den Parameter Wassertiefe zu.

Nach diesen Kriterien lassen sich weitere Potenziale erstellen. Das sind z.B. die Einhaltung eines vorgegeben Rechtsverkehrs, Vorschriften für Brückendurchfahrten oder das Vorhandensein einer Fahrrinne verbunden mit dem Zwang innerhalb der Fahrrinne fahren zu müssen oder verbunden mit der Empfehlung dort zu fahren. Dies soll am Beispiel der Pfaffendorfer Brücke am Rhein bei Rh-km 590,9 dargestellt werden. Die Pfaffendorfer Brücke hat drei Durchfahrten. Das mittlere Joch ist ausschließlich für die Talfahrt vorgesehen. Die beiden anderen Durchfahrten stehen der Bergfahrt zur Verfügung. Für die Modellierung der Potenziale werden in dem Querprofil oberhalb und unterhalb der Brücke im Bereich der erlaubten Brückendurchfahrt die Potenziale auf 100 % gesetzt. Die übrigen Bereiche der Brücke erhalten das Potenzial 0 (Bild 28). Damit wird der Algorithmus zur Kursachsengenerierung, welcher nach der Aufstellung der Potenziale gestartet wird, gezwungen, sich einen Weg durch die erlaubten Durchfahrten zu suchen. Die entsprechende Modellierung für die Talfahrt ist in Bild 29 dargestellt.

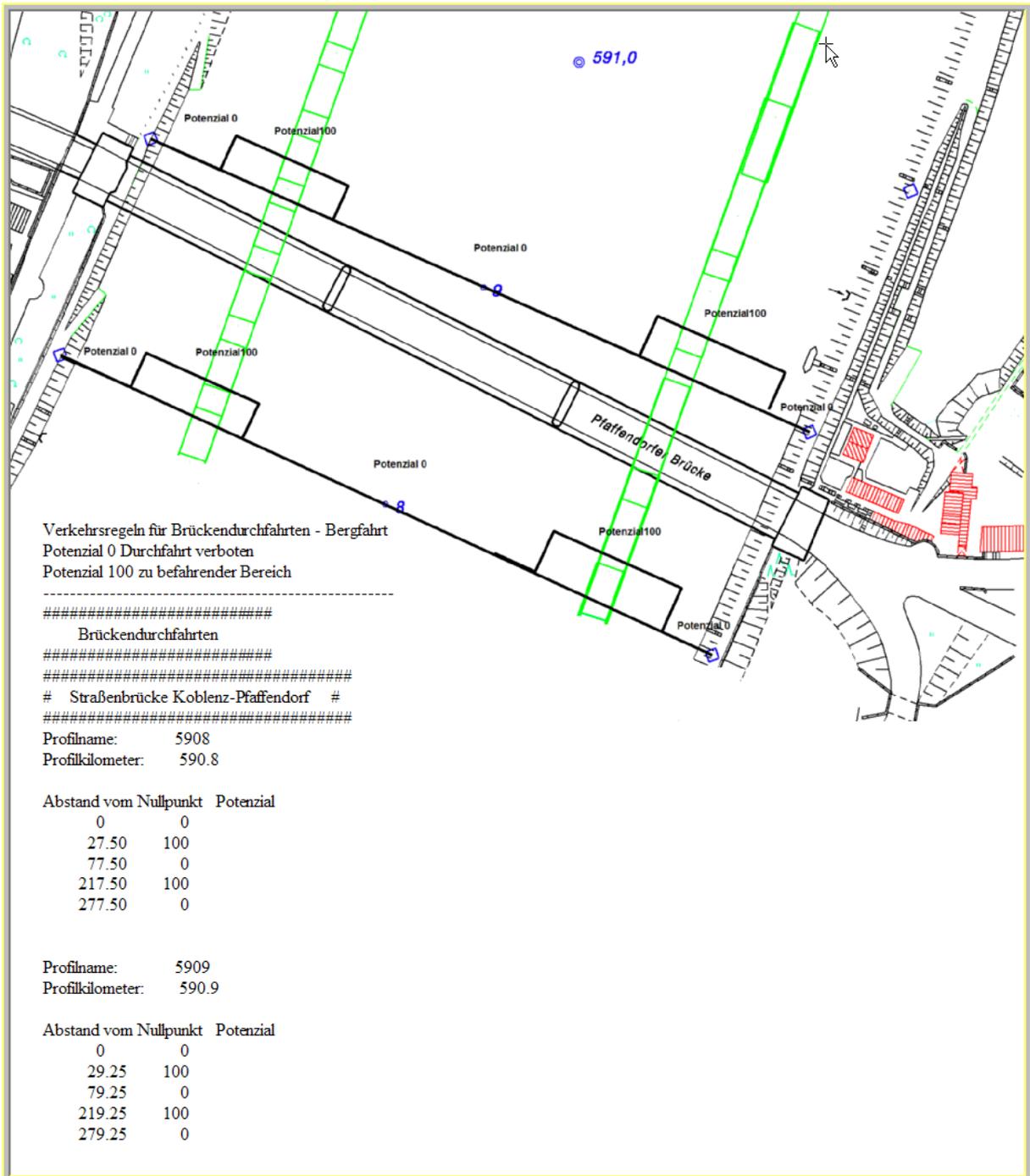


Bild 28: Befahrbarkeitspotenzial Bergfahrt am Beispiel Pfaffendorfer Brücke

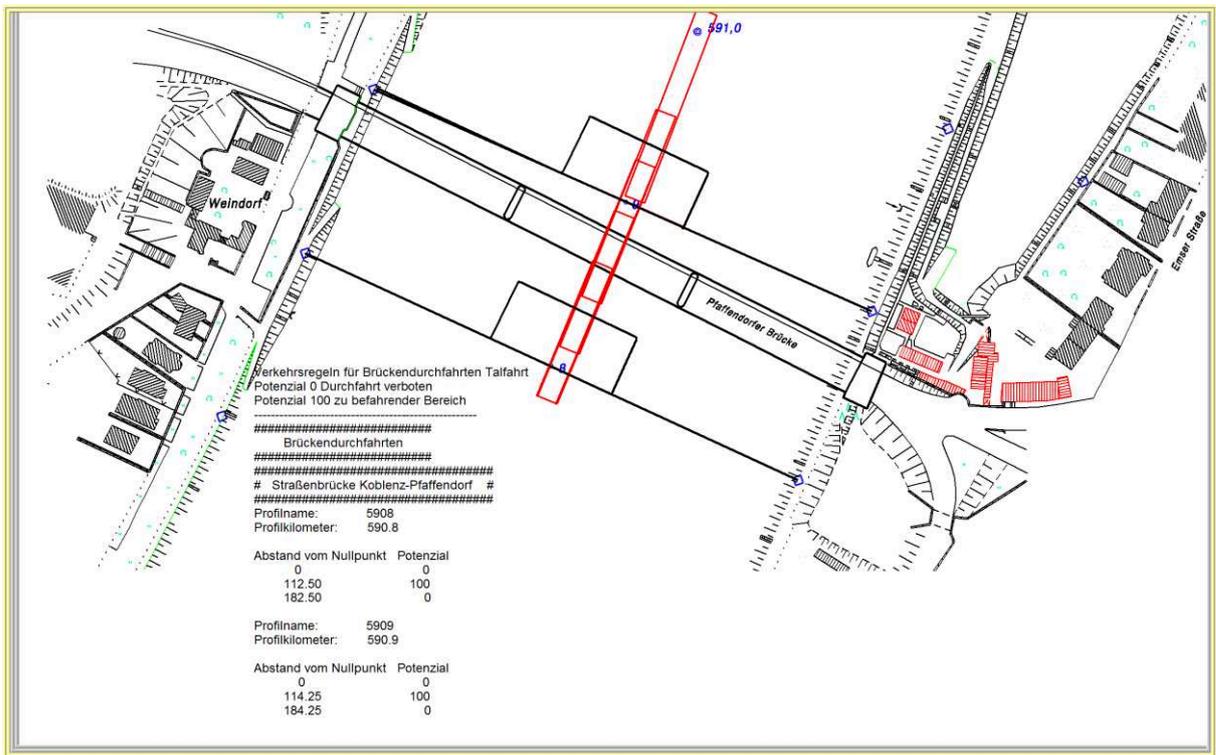


Bild 29: Befahrbarkeitspotenzial Talfahrt am Beispiel Pfaffendorfer Brücke

Darüber hinaus gibt es je nach Gewässer Verkehrsregeln, die einzuhalten sind. Am Rhein gelten z.B. beim Überschreiten der Hochwassermarken 1 laut Rheinschiffahrtspolizeiverordnung /5.1/ Sonderregeln. So muss der Bergfahrer im mittleren Drittel der Fahrrinne fahren. Aus diesem Grund wird das mittlere Drittel auf 100 % gesetzt. Da die anderen Bereiche des Gewässers ebenfalls befahren werden dürfen, werden diese auf 10 % bzw. 1% gesetzt. Gibt es also triftige Gründe, dieser Regel nicht zu folgen, ist mit dieser Art der Modellierung eine Abweichung möglich.

Für den Talfahrer steht in der Rheinschiffahrtspolizeiverordnung, dass er möglichst die Mitte des Flusses anhalten soll. Da sich aus den Uferlinien keine verwertbaren Regeln generieren lassen, wurde ersatzweise die Fahrrinne als Basis zur Generierung der Regel gewählt. Um die Mitte der Fahrrinne zu bevorzugen, wurde eine Dreiecksverteilung für das Potenzial über das Querprofil gewählt (Bild 31).

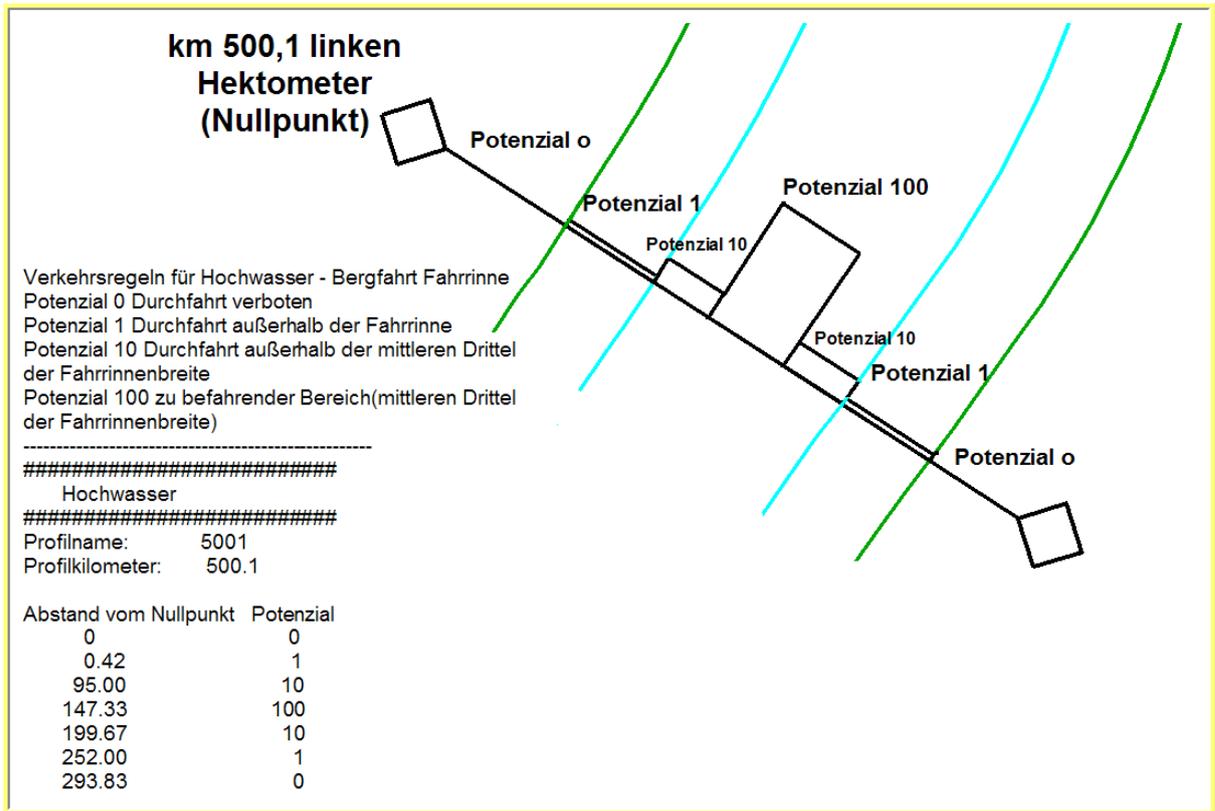


Bild 30: Befahrbarkeitspotenzial für die Bergfahrt auf dem Rhein bei Hochwasser

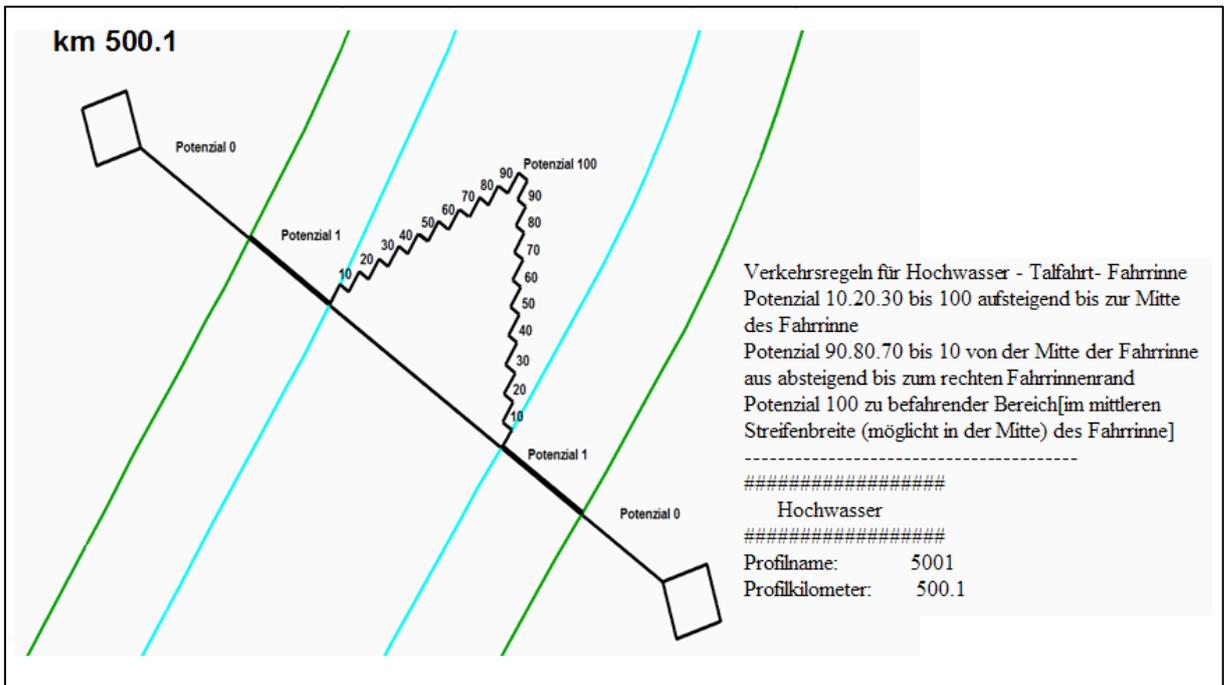


Bild 31: Befahrbarkeitspotenzial für die Talfahrt auf dem Rhein bei Hochwasser

Alle diese Potenzialverteilungen werden über das jeweilige Querprofil streifenweise bereitgestellt und normiert auf den Wertebereich von 0 bzw. 1 bis 100 bereitgestellt. Die Anzahl der Streifen pro Profil ist frei wählbar. Die Breite der Streifen pro Potenzial und pro Profil ist variabel. Aus dem flussbaulichen HN-Modell werden die Eingangsparameter, wie die Wassertiefen- und Strömungsgeschwindigkeitsverteilung innerhalb des Querprofils streifenweise tiefengemittelt bereitgestellt. Das Potenzial P_i eines einzelnen Parameters im i -ten Profilstreifen ergibt sich damit wie folgt:

Falls der Maximalwert des Parameters optimal ist, gilt (z.B. Wassertiefe):

$$P_i = P_{min} + \left[\frac{(P_{max} - P_{min}) * (W_i - W_{min})}{W_{max} - W_{min}} \right] \quad \text{Gl.63}$$

Falls ein kleiner Parameterwert angestrebt wird, gilt (z.B. Strömung für Bergfahrer):

$$P_i = P_{min} + \left[\frac{(P_{max} - P_{min}) * (W_{max} - W_i)}{W_{max} - W_{min}} \right] \quad \text{Gl.65}$$

Dabei sind

P_i - Potenzial im i -ten Profilbereich

P_{min} - niedrigstes Potenzial (im Normalfall immer 1)

P_{max} - höchstes Potenzial (im Normalfall immer 100)

W_i - Parameterwert im i -ten Profilstreifen

W_{min} - kleinster Parameterwert auf gesamten Profilschnitt

W_{max} - größter Parameterwert auf gesamten Profilschnitt

In der Regel wird der zum Potenzial normierte Parameterwert W_i direkt aus den Eingangsparametern gelesen (z.B. Profilströmungen). Bei der Bewertung der Wassertiefe ergibt sich der Wert aus folgender Differenz:

$$W_i = TW_i - (TT + TS + TF) \quad \text{Gl.66}$$

Dabei sind

TW_i - Wassertiefe im i -ten Profil-Bereich (aus Parameterdatei)

TT - Tiefgang des Schiffes

TS - Squat des Schiffes

TF - Flottwasser

Die Summe aus TT, TS und TF entspricht der verlangten Mindestwassertiefe.

Für die Modellierung eines Flusses wurden folgende Potenziale vorgesehen:

- Wassertiefenverteilung
- Strömungsverteilung

- Vorhandensein und Nutzungsvorgabe einer Fahrrinne
- Verkehrsmodus (z.B. Vorgabe eines Rechtsverkehrs)
- Brückendurchfahrtsregeln
- Vorhandensein von Fahrinnenteilungen mit entsprechenden verkehrlichen Vorgaben
- Vorgabe zur Nutzung der blauen Tafel (Begegnung Stb/Stb)
- Sonderregeln, die z. B. nur bei Hochwasser (am Rhein Erreichen der HWM I) gelten

Die Potenzialregeln werden entlang des zu untersuchenden Flusses für jedes Querprofil aufgestellt /5.2/. Ein Beispiel für den Rhein zwischen Rh-km 569 und Rh km 575 ist in Bild 32 dargestellt.

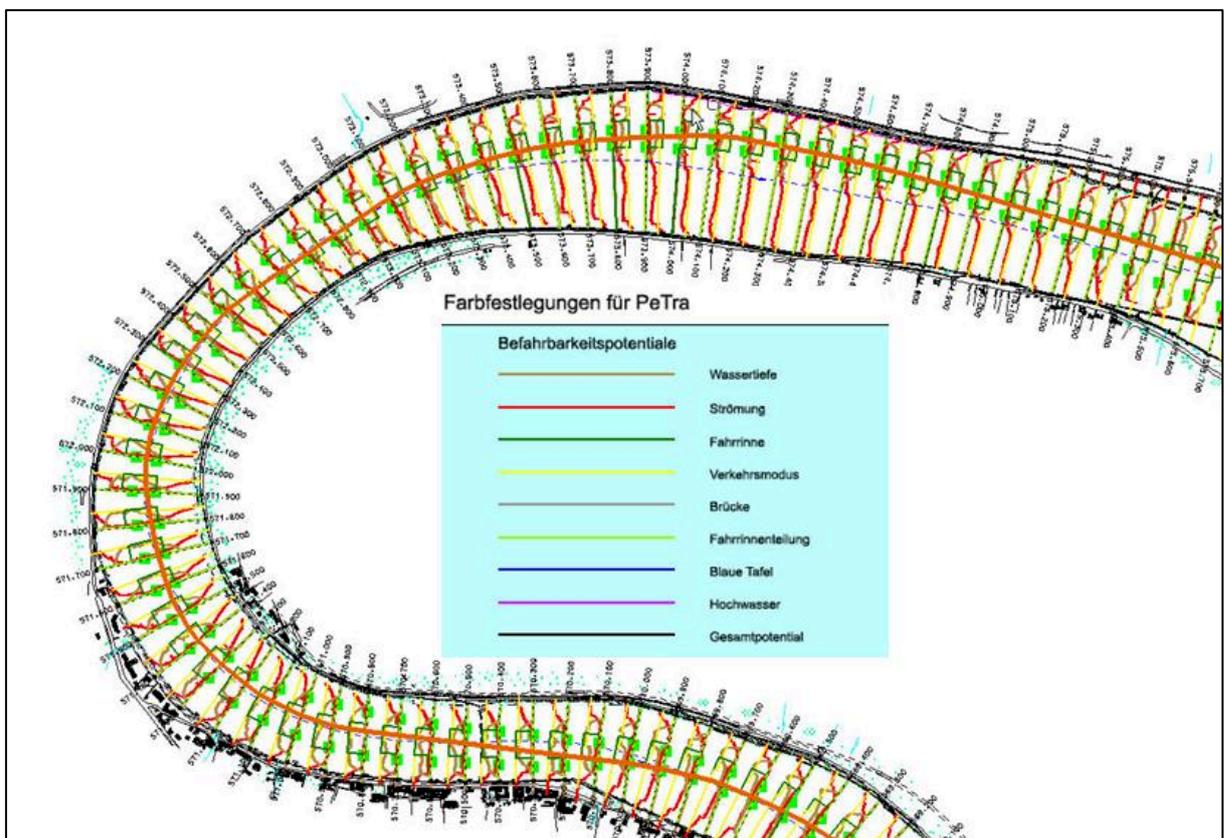


Bild 32: Profilmöglichkeiten entlang des Rheins zwischen Rh-km 569 bis Rh-km 575

Für die Bewertung der Befahrbarkeit unter Einbeziehung aller verfügbaren Gewässerparameter werden die einzelnen Potenziale zu einem Gesamtpotenzial zusammengefasst. Dafür werden entlang jeder Profilschnittlinie k gleichgroße Bereiche mit einer Breite b verwendet, die mit einer Schrittweite s vom Beginn des ersten verfügbaren Potentialstreifens an bis zum Ende des letzten Potentialstreifens erzeugt werden (Bild 33). Als Schrittweite s wird eine halbe Schiffsbreite ($B/2$) verwendet. Die Breite b des Profilbereichs entspricht der minimalen erforderlichen Torbreite und ist sowohl von den Schiffsabmessungen (B , L) und seinem C_f -Wert als auch vom Radius der Kursachse abhängig. Da die Kursachse noch nicht

existiert, wird stattdessen der Radius der Fahrrinne R im Profil-km verwendet. Für C_f wird vereinfacht die fahrdynamische Konstante in ruhenden Gewässern (C_{fR}) eingesetzt.

Bei gerader Strecke gilt:

$$b = B$$

In Kurven mit einem C_{fR} Wert zwischen 0,5 und 1,0 gilt:

$$b = \sqrt{(R + B)^2 + (C_{fR} * L)^2} - R \quad \text{Gl.67}$$

In Kurven mit $C_{fR} > 1$ gilt:

$$b = \left(\sqrt{(R + B)^2 + (C_{fR} * L)^2} - R \right) - \left(\sqrt{R^2 + ((C_{fR} - 1) * L)^2} - R \right) \quad \text{Gl.68}$$

Für jedes Gewässerpotenzial wird der Potenzialmittelwert P_i im Bereich b ermittelt. Dabei wird berücksichtigt, dass sowohl die Breite s_i der Potentialstreifen variabel sein kann als auch, dass sich die Streifen und Profilbereiche überschneiden können (Bild 33). Darüber hinaus wird eine Gewichtung w der einzelnen Potenziale eingeführt. Mit dieser Gewichtung wird es möglich, die Bedeutung einzelner Potenziale hervorzuheben oder abzumindern. So ist z.B. die Wassertiefe für ein Containerschiff, welches in der Regel mit geringem Tiefgang fährt, weniger von Bedeutung als für ein Schiff, welches mit seinem Tiefgang die maximalen Möglichkeiten des Gewässers ausnutzt. Die Summe der n Mittelwerte P_i unter Berücksichtigung der Gewichtung w_i jedes Gewässerparameters ergibt dann für jeden der k Profilbereiche die zur Bewertung verwendete Potentialsumme Pb_{SUM} :

$$Pb_{SUM} = P_1 * w_1 + P_2 * w_2 + \dots + P_n * w_n \quad \text{Gl.69}$$

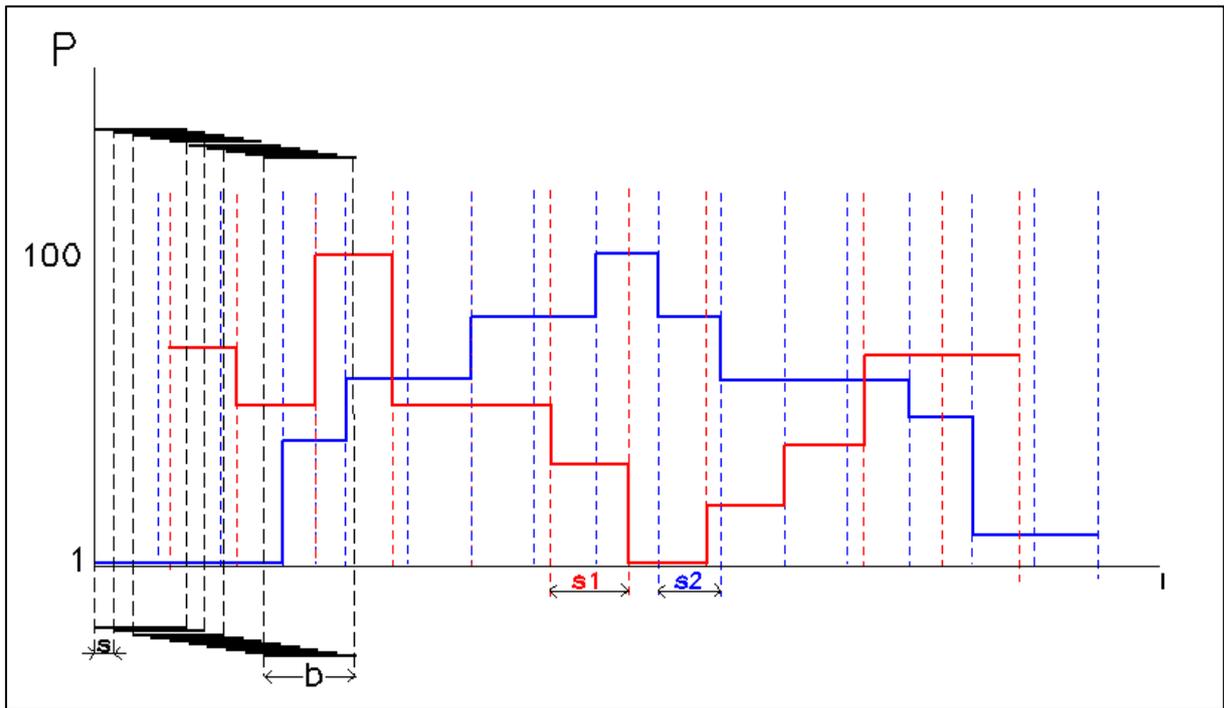


Bild 33: Zusammenfassung aller Einzelpotenziale zu einem Gesamtbefahrbarkeitspotenzial

Anhand des Eingangs aufgezeigten Beispiels für das Querprofil bei Rh-km 551,3 kann man die Entstehung eines Befahrbarkeitspotenzials sehen (Bild 34). Ausgangspotenzial war die Bewertung der Wassertiefe (in der unteren Bildhälfte braun dargestellt). Weitere Potenziale sind die Nutzung der Fahrrinne (grün), die Strömungsverteilung als Ziel für den Talfahrer (rot) und der Verkehrsmodus für die vorgeschriebene Nutzung der rechten Fahrinnenhälfte.

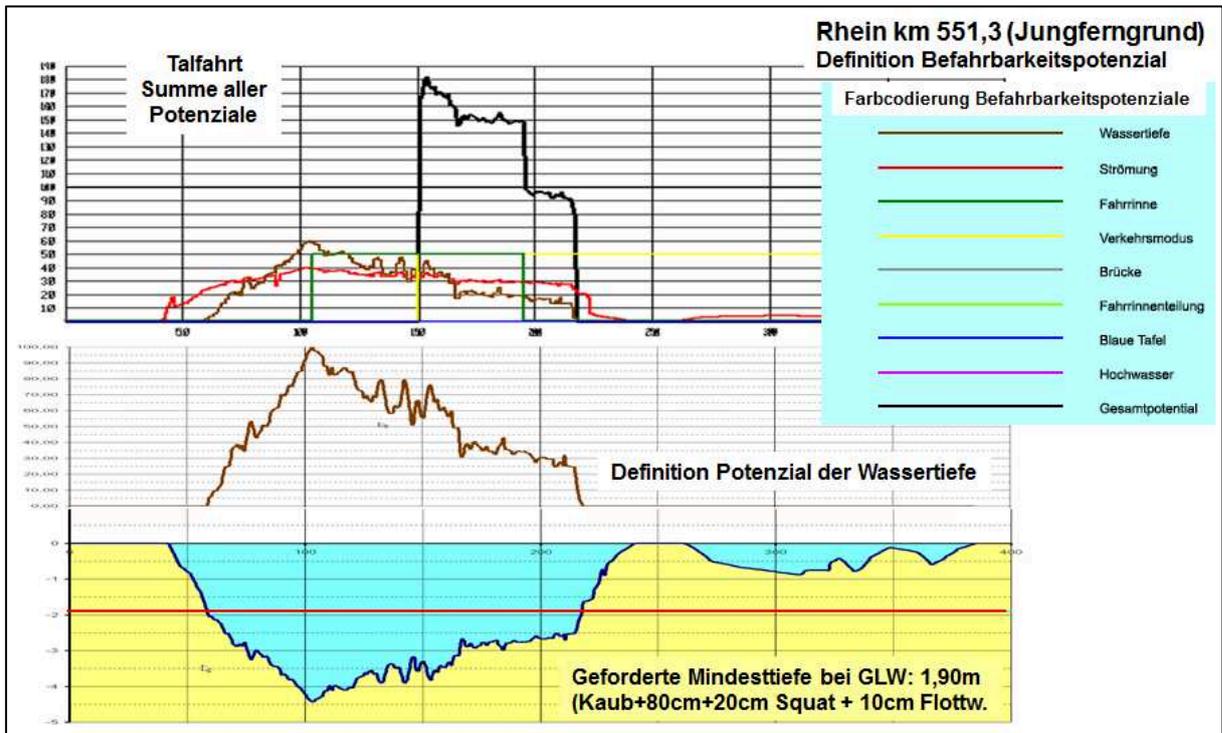


Bild 34: Zusammenfassung aller Potenziale am Beispiel Rh-km 551,3

Unter Berücksichtigung der entsprechenden Gewichtungen wurden die Einzelpotenziale zu einem Befahrbarkeitspotenzial (schwarz) zusammengefasst. Liegen diese Gesamtpotenziale für einen Streckenabschnitt vor, kann auf deren Grundlage die Kursachse ermittelt werden.

5.2 Generierung der Kursachsen

Der Profilbereich mit dem höchsten Befahrbarkeitspotenzial gilt als optimal befahrbar und wird nachfolgend als "Passagetor" bzw. "Tor" bezeichnet, das von der Kursachse durchlaufen werden sollte. Sofern es auf einem oder mehreren Profilen Bereiche mit ähnlich hoher Potenzialsomme gibt (Toleranzbereich für gleichwertige Potenziale ist definierbar), entstehen auf diesen Profilschnitten mehrere gleichwertige Tore und damit eine Vielzahl möglicher Kursachsenverläufe, aus denen das Programm jenen mit dem kürzesten Weg ermittelt. Der Durchstoßpunkt der Kursachse durch das letztendlich pro Profilschnitt ausgewählte Tor wird so gelegt, dass das Schiff beim Durchfahren aller Tore einen möglichst kurzen Weg mit geringen Richtungswechseln zurücklegt. In einem letzten, komplexen Berechnungsalgorithmus wird versucht, die Durchstoßpunkte aller Tore so durch eine Folge von Geraden und Kreisbögen zu verbinden, dass eine Modell-Kursachse mit tangentialen Übergängen zwischen den Geraden und Kreisbögen entsteht, die möglichst alle Tore durchläuft.

Der Berechnungsalgorithmus zur Generierung der Kursachse besteht also grundsätzlich aus drei Arbeitsschritten:

1. Bestimmung von Anzahl und Breite der Passagetore mit dem höchsten Befahrbarkeitspotenzial je Querprofil!
2. Ermittlung des optimalen Passagetores für jedes Querprofil!
3. Routenoptimierung, um die Durchstoßpunkte der Kursachse durch die Passagetorfolge zu ermitteln.

5.2.1 Bestimmung der Passagetore

Aus allen k untersuchten Profilbereichen wird im Anschluss der Bereich mit der maximalen Potenzialsomme ermittelt. Danach werden zusätzlich all jene Bereiche b_i selektiert (Bild 32), deren Potenzial innerhalb des vorgegebenen Toleranzbereichs mit diesem Potenzialmaximum übereinstimmt. Sofern sich selektierte Bereiche überschneiden oder aneinander grenzen, werden diese zu einem neuen, größeren Bereich zusammengefasst. Falls am Ende ein einziger Bereich pro Profilschnitt verbleibt, stellt dieser bereits das optimale Passagetor dar. Sofern sich auf einem Profil kein Tor mit einer Potentialsomme größer 0 ermitteln lässt, ist das Profil nicht befahrbar. Verbleiben mehrere Passagetore, ist das Optimum in einem weiteren Berechnungsschritt zu ermitteln.

5.2.2 Bestimmung des optimalen Passagetores

Enthalten ein oder mehrere Querprofile im untersuchten Flussabschnitt jeweils mehrere gleichwertige Passagetore, ergeben sich mehrere Varianten für das Durchfahren der Tormitten aufeinander folgender Profile (Bild 35). In diesem Bild sind die Passagetore für jedes Querprofil als schwarze durchgehende Linien dargestellt. Die möglichen Routen sind als schwarze strichpunktierte Polygone eingetragen. Die Auswahl eines geeigneten Tores pro Profilschnitt erfolgt dann anhand des Vergleichs der Länge dieser Polygone. Die ausgewählten Polygone sind blau bzw. rot eingefärbt.

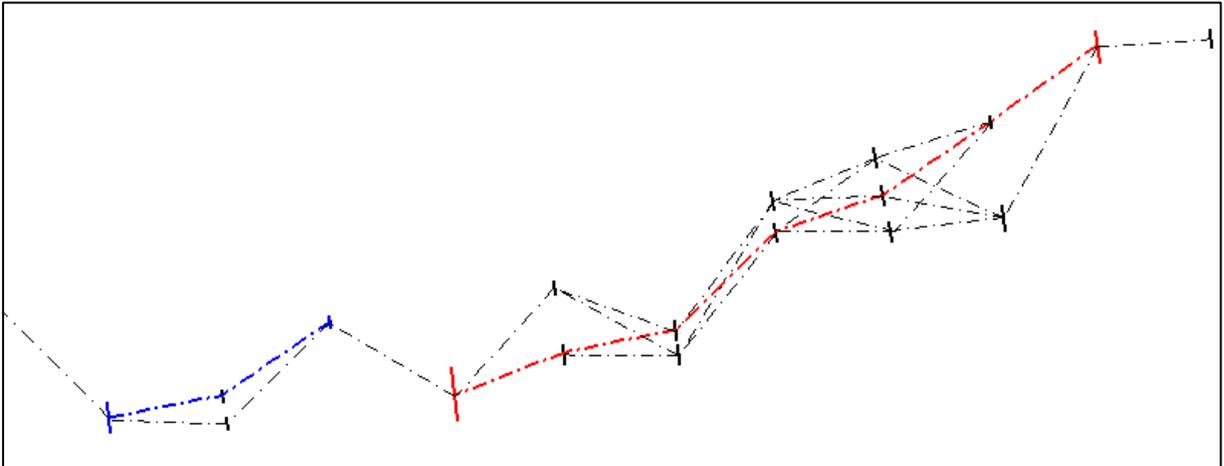


Bild 35: Auswahl geeigneter Passagetore anhand der kürzesten Route

Die von diesen Polygonen genutzte Kette von Passagetoren stellt die Auswahl der optimalen Passagetore dar und dient im nächsten Schritt als Ausgangsgeometrie für die Konstruktion der Kursachsen.

5.2.3 Routenoptimierung und Konstruktion der Kursachse

Nachdem jetzt genau ein Passagetor pro Profilschnitt innerhalb des untersuchten Flussabschnittes ermittelt ist, wird im nächsten Schritt die Kursachse konstruiert. Analog zu dem Verfahren TRASSE soll diese nur aus Geraden und Kreisbögen bestehen. Im Verlauf der Konstruktion wird die Route durch diese Tore so optimiert, dass die zu fahrende Wegstrecke über diese Distanz minimal ist und die gefahrenen Radien in den Stützpunkten einen vorgebbaren Mindestradius nicht unterschreiten.

Die Modellierung der Kursachse als eine Folge von Geraden und Kreisbögen mit tangentialem Übergang erfordert aber weitere Berechnungsschritte. Dazu wird zunächst nochmals die Lage aller Durchstoßpunkte in den Toren optimiert unter dem Aspekt, dass die insgesamt zurückgelegte Wegstrecke minimal ist. Die Punkte werden so auf die Torlinie gelegt, dass die zwei Verbindungslinien dreier aufeinander folgender Durchstoßpunkte einen möglichst stumpfen Winkel bilden. Angestrebt wird ein Winkel von 180 Grad. Da letztendlich das Bemessungsschiff das Tor passieren soll, müssen sich die Durchstoßpunkte TP_n immer mindestens eine halbe Schiffsbreite von der Torbegrenzung entfernt befinden.

Diese Durchstoßpunkte TP_n sind nun durch eine Folge von Geraden und Kreisbögen so zu einer Kursachse zu verbinden, dass jeder Übergang Gerade/Kreisbogen tangential erfolgt und der Radius jedes Kreisbogens möglichst groß ist. In Anlehnung an das Verfahren TRASSE darf der Kurvenradius eine Schiffslänge nicht unterschreiten.

Da es unter diesen Randbedingungen unendlich viele Lösungen gibt, werden weitere Einschränkungen vorgenommen:

- Jeder Durchstoßpunkt soll auf einem Kreisbogen liegen.
- Der Mittelpunkt dieses Kreisbogens liegt immer auf der Winkelhalbierenden h_n der beiden Verbindungsgeraden des Punktes zu seinen Nachbarpunkten (TP_n/ TP_{n-1} bzw. TP_n/ TP_{n+1}).

Die gesuchte gemeinsame Tangente zwischen dem n -ten Kreisbogen und seinem Vorgängerbogen ($n-1$) darf den Vorgängerbogen maximal im Durchstoßpunkt TP_{n-1} berühren (Bild 36). Tangiert Sie diesen Kreisbogen erst später (auf dem "weiter entfernten" Bogenbereich), wird der Durchstoßpunkt TP_{n-1} am Ende nicht auf dem für die Kursachse verwendeten Bogenstück, also neben der Kursachse, liegen. Das heißt, der maximale zulässige Radius r_{n1} des Kreisbogens durch TP_n ist erreicht, wenn die gemeinsame Tangente mit dem Vorgängerbogen durch TP_{n-1} geht.

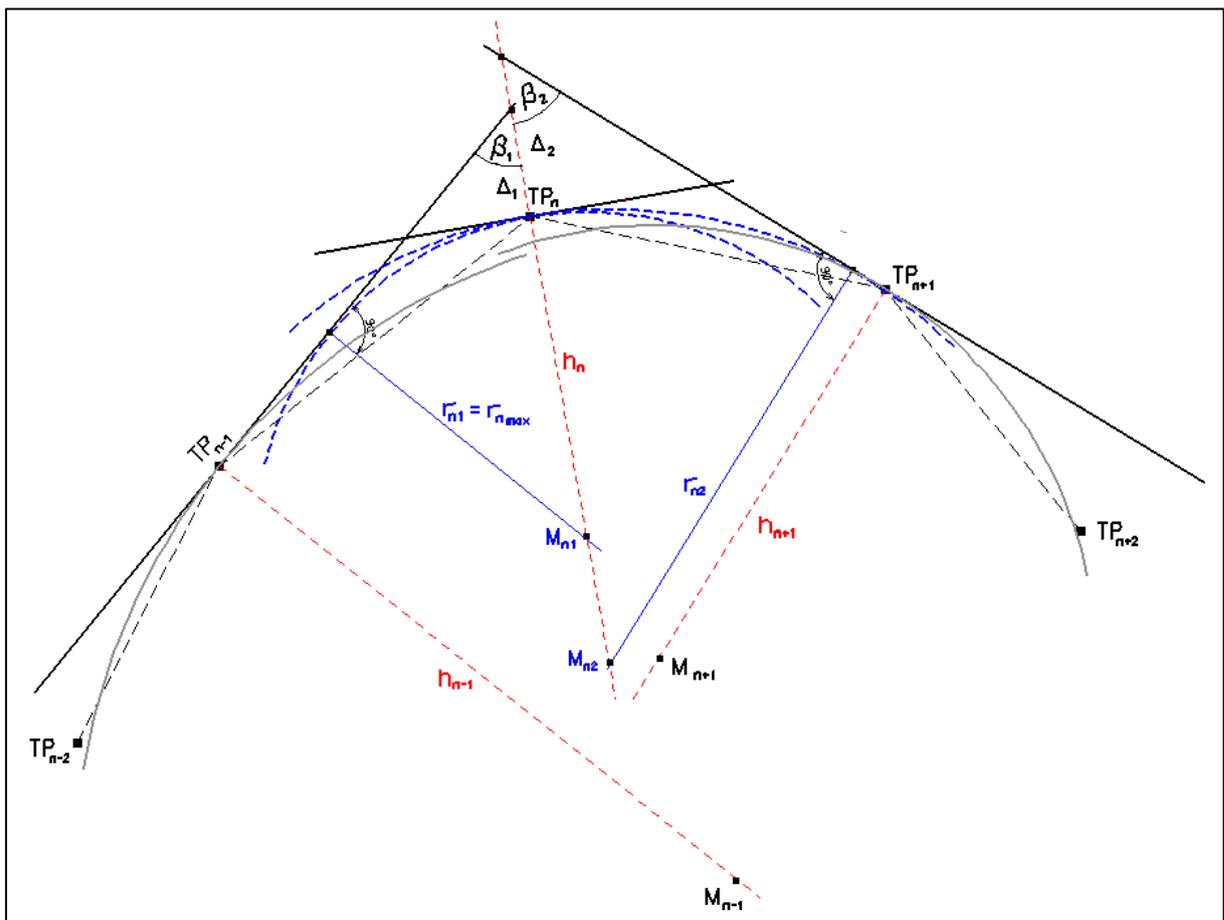


Bild 36: Ermittlung eines Kreisbogens durch die Passagetore ohne Richtungswechsel

Da dieselbe Bedingung auch für die gemeinsame Tangente mit dem Nachfolger-Bogen $n+1$ gilt (maximaler Radius r_{n2}), ergibt sich der letztendlich zulässige Radius des n -ten Kreisbo-

gens aus dem Minimum von r_{n1} und r_{n2} . Um eine Bogenlänge größer als 0 zu garantieren, darf dieser Grenzwert nie erreicht werden. Das Verfahren verwendet deshalb einen Radius von 9/10 dieses Maximalwerts.

Aus

$$\sin b_1 = \frac{r_{n1}}{(r_{n1}+D_1)} \quad \text{bzw.} \quad \sin b_2 = \frac{r_{n2}}{(r_{n2}+D_2)} \quad \text{Gl. 70}$$

ergibt sich

$$r_{n1} = \frac{D_1 \cdot \sin b_1}{1 - \sin b_1} \quad \text{bzw.} \quad r_{n2} = \frac{D_2 \cdot \sin b_2}{1 - \sin b_2} \quad \text{Gl. 71}$$

und es folgt:

$$r_{nMax} = 0,9 * \text{Min}(r_{n1}, r_{n2}).$$

Dies gilt, sofern kein Fahrtrichtungswechsel und damit kein Vorzeichenwechsel unmittelbar vor oder nach dem Tor stattfindet. Die Abstände D_1 und D_2 werden aus den Schnittpunkten der Tangenten durch TP_{n-1} bzw. TP_{n+1} mit der Winkelhalbierenden h_n ermittelt.

Wenn die Route unmittelbar vor oder nach einem Tor einen Vorzeichenwechsel des Kurvenradius erfordert, sind die Gleichungen zur Bestimmung von r_{n1} und r_{n2} nicht anwendbar. In diesem Fall muss einer der beiden, zum Vergleich herangezogenen Radien wie folgt berechnet werden (Bild 37):

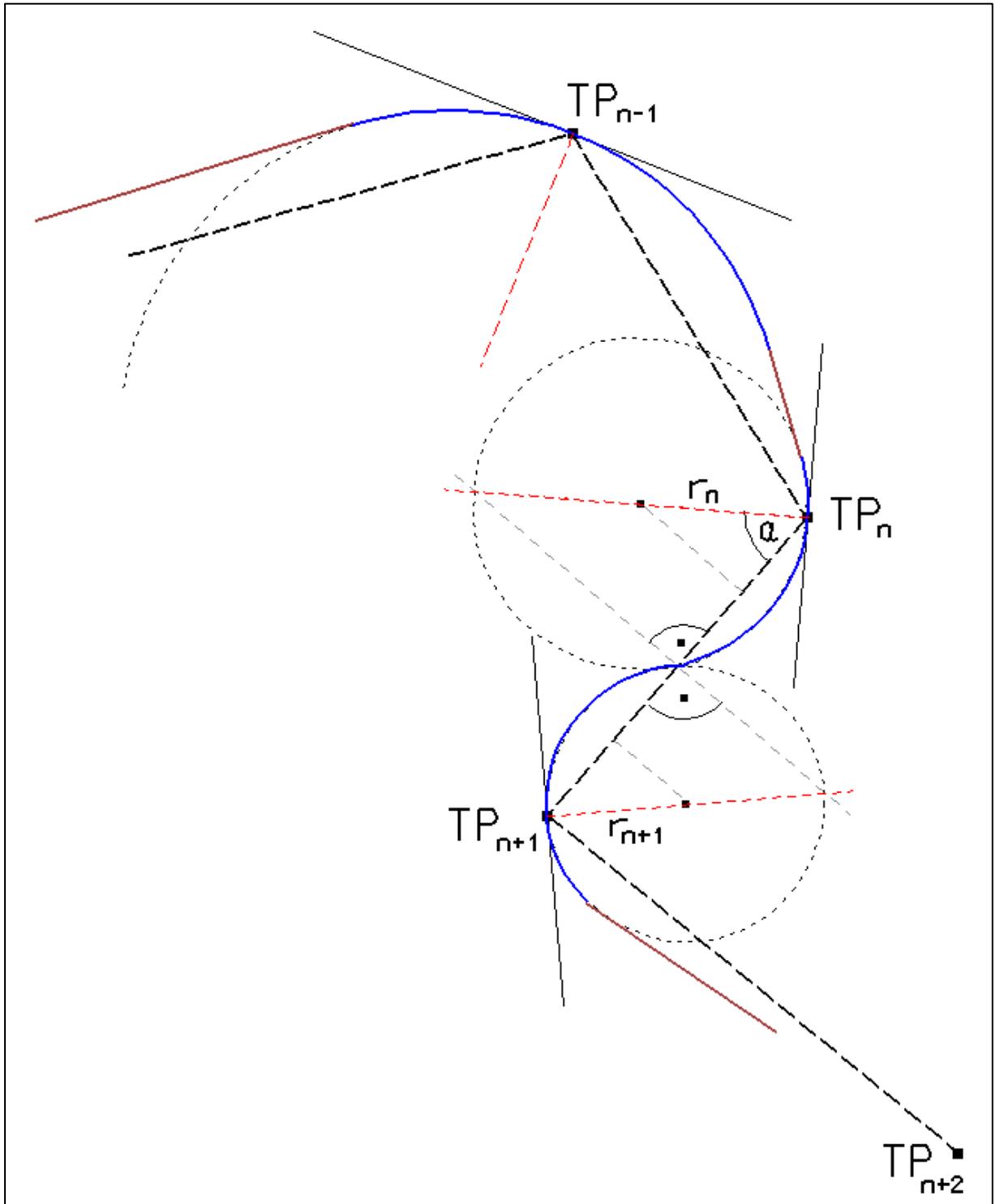


Bild 37: Radien bei Vorzeichenänderung der Fahrtrichtung

$$r_n = \frac{a}{4 \cdot \cos \alpha}$$

Dabei ist a der Abstand zwischen TP_n und TP_{n+1}

Im Beispiel in Bild 37 findet der Fahrtrichtungswechsel nach dem n -ten Tor statt und die Gleichung zur Bestimmung von r_n muss jeweils für einen der beiden Vergleichsradien r_{n2} und r_{n+11} angewendet werden, um die maximal zulässigen Radien r_{nMax} der beiden Bögen durch TP_n und TP_{n+1} ermitteln zu können.

Da sich die Größen der Bogenradien gemäß vorgegebenem Mindestradius und des errechneten r_{nMax} nur in diesem vorgegebenen Bereich bewegen können, ist es nicht immer möglich, alle Tore unter Einhaltung aller Bedingungen zu passieren. Ist die Einbeziehung eines Passagetores in die Kursachse nicht möglich, kann es zumindest in seiner berechneten Größe nicht beachtet werden. Um die Fahrrinne im Profilschnitt trotzdem zu berücksichtigen, wird es deshalb auf die volle Fahrrinnen- bzw. Fahrwasserbreite erweitert. Als Folge müssen die Durchstoßpunkte der Kursachse durch dieses und seine Nachbartore angepasst werden, was wiederum eine Neuberechnung der Bogenradien durch diese und weitere benachbarte Tore notwendig macht. Auch dieser Vorgang erfordert eine Neuberechnung von Durchstoßpunkten und Bogenradien. Die Berechnung der Kursachse läuft deshalb in einem iterativen Prozess ab, in dem mehrere Teilberechnungen erfolgen. Erfordert das Ergebnis einer Teilberechnung die Änderung der Anzahl oder der Position eines Durchstoßpunktes, wird der Gesamtprozess erneut durchlaufen. Das geschieht so oft, bis Anzahl und Position der Punkte konstant bleiben und eine Verbindung der Punktefolge durch Bögen und gemeinsamen Tangenten zur Kursachse möglich ist.

Folgende Berechnungsschritte werden in dieser Iteration ausgeführt:

1. Berechnung der Folge von Durchstoßpunkten durch die Tore
2. Ggf. Eliminierung kollinearere Tore (Tore, deren Durchstoßpunkte mit minimaler Abweichung auf der Verbindung Vorgänger-Nachfolgepunkt liegen)
3. Ermittlung der Tore, bei denen ein Fahrtrichtungswechsel stattfindet (Vorzeichenänderung der Bogenradien)
4. Berechnung der Bogenradien und ggf. Verbreiterung einzelner Tore
5. Testberechnung der Kursachse (lassen sich alle Bögen durch Tangenten verbinden) und ggf. Eliminierung von Toren

Nach diesen Berechnungen werden solche aufeinander folgende Durchstoßpunkte gesucht, die sich auf einem einzigen Kursachsen-Kreisbogen darstellen lassen. Dazu wird für jeden Kreisbogen durch ein Tor geprüft, ob und wie viele unmittelbar nachfolgende Tore (mit gleichem Bogenradiusvorzeichen) er so schneidet, dass sich der Schnittpunkt jeweils mindestens eine halbe Schiffsbreite von der Torbegrenzung entfernt befindet. Der Bereich der Kursachse durch diese aufeinander folgenden Tore wird dann von einem einzigen Kreisbogen gebildet. Im Anschluss muss die an diesen Kreisbogen anschließende Tangente zum nachfolgenden Bogen erneut berechnet werden.

5.3 Zeitgesteuerte Navigation

Durch die Interaktion zwischen den Fließgeschwindigkeiten im Fahrbereich des Schiffes und den fahrdynamischen Parametern des Schiffes soll die Bewegung des Schiffes nach Ort und Zeit simuliert werden, so dass Orts-Zeitkurven entstehen, aus denen Begegnungen und Überholungen abgeleitet werden können (Bild 38 oben).

Zu den genannten Randbedingungen ist es dann möglich, die Verkehrssituation bei der Berechnung der Kursachsen zu berücksichtigen. In diesem Fall werden die Daten mehrerer Schiffe vorgegeben. Das Programm muss darüber hinaus die Positionen aller Verkehrsteilnehmer (km entlang des Gewässerverlaufs) in einem vorgegebenen Berechnungszeittakt ermitteln können. Als Datenbasis dient dazu eine Ortskurve pro Schiff, die dessen km-Position zu diskreten Zeitpunkten enthält.

Das entsprechende Programmsystem BoatSim greift auf die Ergebnisse des hydraulischen Modells und erlaubt zusätzlich die Erfassung notwendiger Schiffsparameter (Länge, Breite, Tiefgang, Typ, u.a.) sowie die Eingabe spezifischer Randbedingungen der Schifffahrt, wie z.B. Startzeit, Startkilometer und Schiffsgeschwindigkeit gegen Wasser. Dabei können die Schiffsgeschwindigkeiten gegen Wasser abschnittsweise veränderlich vorgegeben werden.

Im Anschluss an die Berechnung der Kursachsen für die ungestörte Fahrt des Schiffes werden aus den Orts-Zeitkurven die Bereiche ermittelt, in denen Begegnungen bzw. Überholungen stattfinden. Die Schiffe bauen in Abhängigkeit ihrer Abmessungen und angestrebter Sicherheitsabstände Mulden in umgebende Befahrbarkeitspotenzialfelder auf und zwingen sich so gegenseitig zu entsprechenden Ausweichmanövern. Diese Algorithmen wurden unter dem CAD-System MicroStation umgesetzt. Die Richtigkeit des verbesserten fahrdynamischen Modells wird z.Z. auf mehreren Flüssen anhand von Naturuntersuchungen überprüft.

Im Rahmen der Schnittstellenerweiterung zwischen den Programmen BoatSim und PeTra 1D wurde in BoatSim eine ECDIS-Oberfläche eingeführt, mit deren Hilfe künftig die berechneten Orts-Zeitkurven auch innerhalb der ECDIS-Karte flächenhaft dargestellt werden (Bild 38 unten).

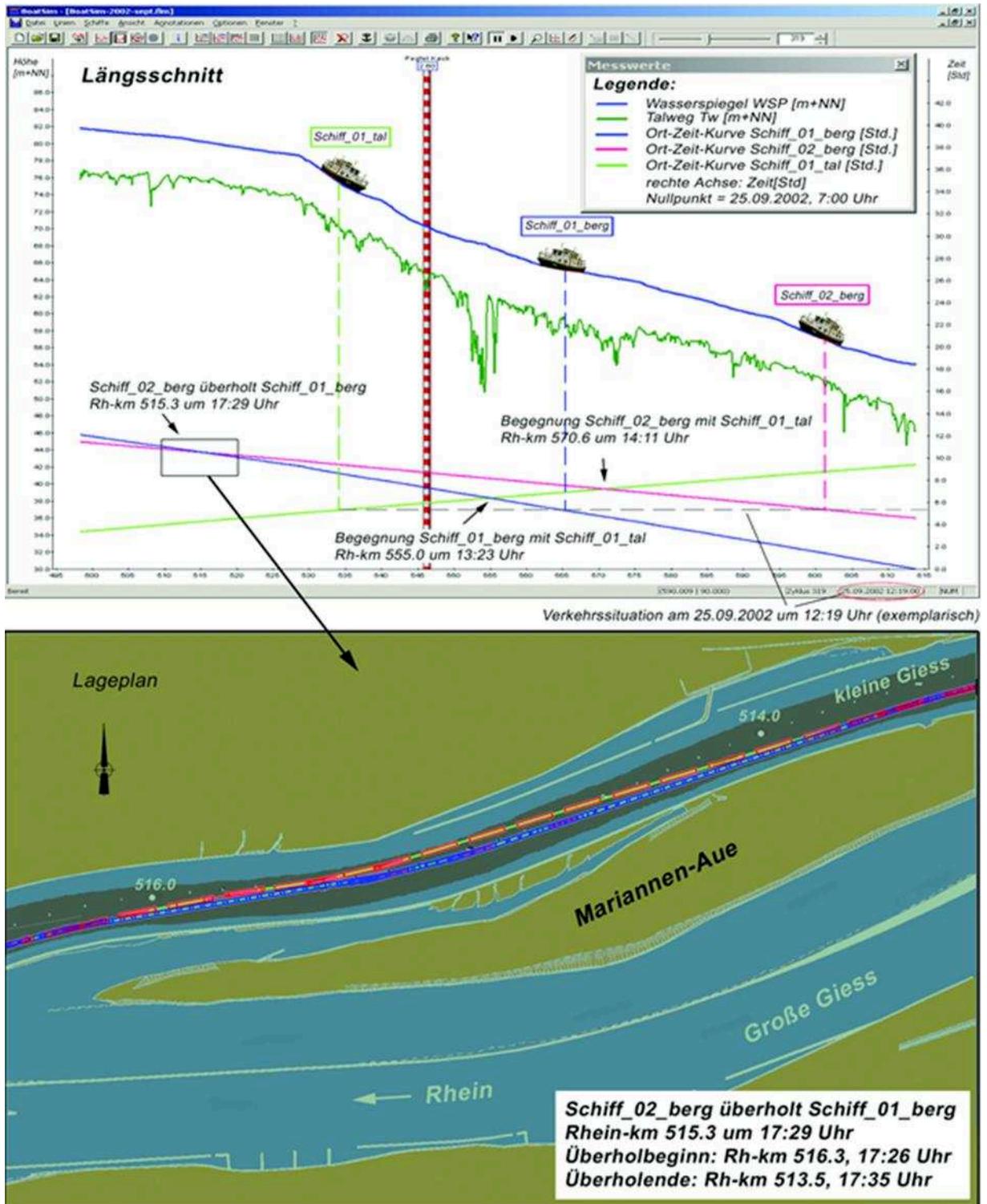


Bild 38: Ergebnisdarstellung von BoatSim

Oben: dynamische Darstellung im Längsprofil mit berechneten Orts- Zeitkurven
 Unten: Berechnetes Überholmanöver (ohne Gegenverkehr) entsprechend obiger Orts-Zeitkurve

Der Einfluss jedes Schiffes auf andere Wasserfahrzeuge wird durch eine parametrisierbare Potenziensenke um den Schiffskörper herum beschrieben, die ggf. die Lage der Passagetore der Fremdschiffe auf den Profilschnitten und damit deren Kursachse beeinflusst. Diese Potenziensenke teilt über die Befahrbarkeitspotenziale der Flussquerprofile anderen Schiffen mit, dass hier ein Schiff vorhanden ist und dass die anderen Schiffe Abstand halten sollen. Das Befahrbarkeitspotenzial dieser Senke ist innerhalb der Schiffsfläche (mit Sicherheitsabständen nach vorn, hinten und zur Seite) genau 0 %. Dieser Bereich darf von anderen Verkehrsteilnehmern also nicht befahren werden, da es sonst zu einer Kollision kommen würde. Nach außen nimmt die Potenziensenke stufenweise zu, bis sie letztendlich 100 % erreicht (Bild 39). Die Ausdehnung des Potenzialfeldes (also der Abstand zwischen dem kleinsten und dem größten Potenzialbereich) in Längs- und Querrichtung sowie die Anzahl der Potenzialstufungen wird schiffstypenabhängig vorgegeben.

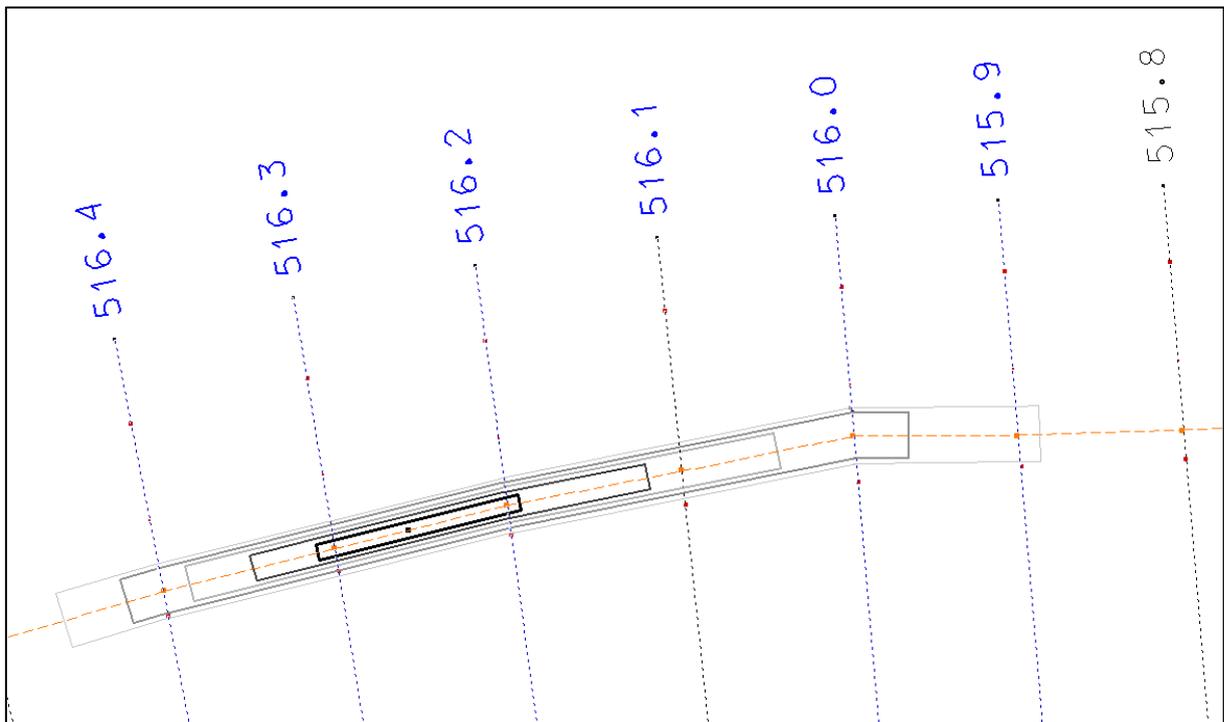


Bild 39: Aufbau eines mehrstufigen Schiffspotenzialfeldes entlang der Ursprungkursachse

Die Potenziensenke breitet sich nicht gleichmäßig um den Schiffskörper aus, sondern verläuft parallel zur Kursachse, die durch die ermittelten Stützpunkte auf den Profilschnitten bestimmt ist. Diese Stützpunkte wurden entweder schon befahren (hinter dem Schiff) oder das Schiff beabsichtigt sie zu befahren (Punkte vor dem Schiff). Dabei überdeckt die Potenziensenke je nach Ausdehnung und aktueller Fahrzeugposition einen Teil der Profilschnitte an den Hektometerpunkten (Bild 39). Entlang der betroffenen Profilschnitte entstehen somit Streifen unterschiedlichen Potenzials, die von Fremdschiffen zusätzlich zu den Gewässerparametern

zu berücksichtigen sind. Bei der verkehrsabhängigen Ermittlung der möglichen Passagetore auf allen innerhalb der Prognose-Distanz voraus liegenden Profilschnitten muss jedes Schiff also auch die durch die Potenzialsenken der Fremdschiffe evtl. hervorgerufenen Potenzialstreifen berücksichtigen. Die Potenzialsomme, die für jeden der k untersuchten Bereiche b entlang eines Profilschnittes ermittelt wird, ergibt sich für jedes Schiff s wie folgt:

$$P_{bSUMs} = P_{S1} * w_1 + P_{S2} * w_2 + \dots + P_{Sn} * w_n + [(F_{S1} + F_{S2} + \dots + F_{Sm}) * (n * w_F)] \quad \text{Gl.72}$$

P_{si} - Mittleres Streifenpotenzial des Gewässerparameters i für das Schiff s
 (i=1...Parameteranzahl n)

F_{sj} - Mittleres Streifenpotenzial für das Schiff s, hervorgerufen durch das Fremdschiff j
 j=1...Anzahl der Schiffe m; j ungleich s)

w_F - Gewichtung der Fremdschiffpotenziale

Die Gewichtung w wird mit der Anzahl n der berücksichtigten Gewässerparameter multipliziert, um das Verhältnis zwischen der Einflussmöglichkeit des Gewässers und der eines Fremdschiffes auf die Route auch bei wechselnder Anzahl der verfügbaren Gewässerdaten proportional zu halten. Dabei gilt:

- Sind für einen Bereich einzelne Parameterdaten nicht verfügbar, werden diese Potenziale bei der Aufsummierung zum Gesamtpotenzial des Bereichs nicht berücksichtigt.
- Hat das Potenzial P_{si} eines Gewässerparameters oder das Schiffspotenzial F_{sj} eines Fremdschiffes den Wert 0, gilt dieser Teilbereich des Profils als nicht befahrbar ($P_{bSUMs} = 0$) und kommt nicht als mögliches Passagetor in Frage.

Aus allen k untersuchten Profilbereichen wird im Anschluss der Bereich mit der maximalen Potenzialsomme ermittelt. Danach werden zusätzlich all jene Bereiche selektiert, deren Potenzial innerhalb des vorgegebenen Toleranzbereichs mit diesem Potenzialmaximum übereinstimmt. Sofern sich die selektierten Bereiche überschneiden oder aneinander grenzen, werden diese zu einem neuen, größeren Bereich zusammengefasst. Falls am Ende ein einziger Bereich pro Profilschnitt verbleibt, stellt dieser bereits das optimale Passagetor dar. Verbleiben mehrere Passagetore, wird das Optimum in einem weiteren Berechnungsschritt ermittelt.

Der Algorithmus zur Vorausberechnung eines Kurses über die vorgegebene Prognose-Distanz basiert auf Gewässerdaten, die nur diskret, nämlich auf den Profilschnitten (gewöhnlich alle 100 m) vorliegen. Die Integration der Fremdschiffpotenziale kann deshalb auch nur an diesen diskreten Orten erfolgen. Der Nachteil sind mögliche "sprunghafte" Veränderungen der Lagen der berechneten Passagetore in aufeinander folgenden Profilschnitten. Das kann insbesondere in Situationen auftreten, in denen das Potenzialfeld eines vorausfahrenden

den oder entgegenkommenden Fremdschiffes einen Teil eines oder mehrerer Profilschnitte durch sein Erscheinen innerhalb eines Zeittaktes unpassierbar macht. Das Passagetor auf dem voraus liegenden Profilschnitt muss also an einer Position außerhalb des gesperrten Profilabschnitts liegen. Das kann u. U. auch eine Position sein, bei der das Fahrzeug die Route des Gegenverkehrs kreuzen muss, um sie zu erreichen. Auch einem vorausfahrenden Schiff könnte es bei einem Seitenwechsel zu nahe kommen. Das Programm bewertet die möglichen Passagetore auf den vorausliegenden Profilbereichen deshalb nicht nur hinsichtlich ihrer Befahrbarkeit an diesem Ort, sondern prüft zuvor, ob das Fahrzeug auf dem Weg zur Tormitte das Potenzialfeld eines Fremdschiffes durchqueren müsste. Dazu wird überprüft, ob die untersuchte Route die Linienkette des Zielkurses des Fremdschiffes innerhalb dessen Potentialfeldes schneiden würde. Ist das der Fall, gilt das Tor ebenfalls als nicht befahrbar.

Etwas differenzierter wird dieses Kriterium angewendet, wenn sich dem Fahrzeug ein schnelles Fremdschiff von hinten nähert. Wenn dessen Potentialfeld bereits über den Bug des ersten Fahrzeugs hinaus ragt, kann es u. U. passieren, dass das erste Fahrzeug überhaupt keinen Punkt des nächstliegenden Profilschnittes ansteuern kann, ohne dabei dieses Potentialfeld zu überqueren. Das noch hinter ihm fahrende Schiff würde dem ersten Fahrzeug also paradoxerweise den Weg "versperren". Andererseits ist es aber auch wünschenswert, dass das zum Überholen ansetzende Schiff mit seinem Potentialfeld, den Kurs des vorausfahrenden Fahrzeugs beeinflusst, so dass dieses durch entsprechende Kurskorrekturen Platz macht. Bei solchen Überholmanövern prüft das Verfahren deshalb zunächst, ob das erste Fahrzeug trotz des Potenzialfeld-Einflusses des zum Überholen ansetzenden Schiffes mindestens ein Passagetor auf allen innerhalb der Prognose-Distanz liegenden Profilschnitten finden kann. Ist das der Fall, wird daraus das Optimum ermittelt. Andernfalls erfolgt eine Neubewertung dieser Profilschnitte und der Verbindung dorthin – diesmal aber ohne Berücksichtigung des Potenzialfeldes des überholenden Schiffes.

Nach Abschluss der verkehrsabhängigen Kursachsenberechnung kann die zeitgenaue Bewegung aller beteiligten Schiffe mit voreinstellbarer Ablaufgeschwindigkeit dargestellt werden (Bild 40). Sobald die Modellkursachsen erzeugt wurden, werden diese Routen zur Visualisierung des Verkehrs verwendet.

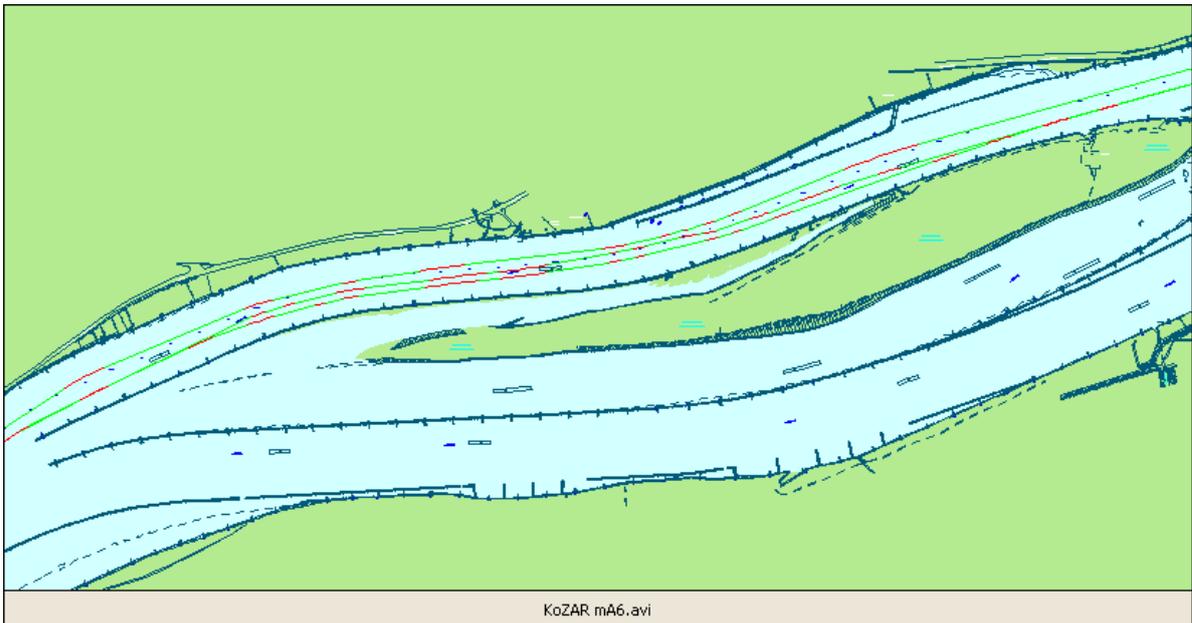


Bild 40: Gerechnetes Überholmanöver

Nachdem die Kursachsen berechnet werden können, muss die Fahrdynamik modelliert werden, mit dem Ziel, die Position des taktischen Drehpunktes in Abhängigkeit der örtlichen Randbedingungen zu bestimmen.

6 Verknüpfung flussbaulicher Modelle mit dem fahrdynamischen Modell

Hydraulisch-fahrdynamische-Modelle bestehen aus vier Grundbausteinen Bild 41. Der erste Baustein umfasst das hydronumerische Abflussmodell, welches auf der Grundlage der Gewässergeometrie für die jeweiligen Abflüsse die Wassertiefen und die Strömungsgeschwindigkeiten und deren Verteilung über den schiffbaren Bereich der Wasserstraße liefert. Der zweite Baustein beschreibt die Fahrdynamik eines Binnenschiffes unter Berücksichtigung der örtlichen Fließgeschwindigkeiten. Der dritte Baustein umfasst eine virtuelle Navigation, mit deren Hilfe Kursachsen im Gewässer generiert werden, die die örtlichen hydraulischen, nautischen und schiffahrtspolizeilichen Randbedingungen berücksichtigen. Als vierter Baustein ergänzt die Zeitreferenzierung die virtuelle Navigation, wodurch ein Routenmanagement ermöglicht wird.

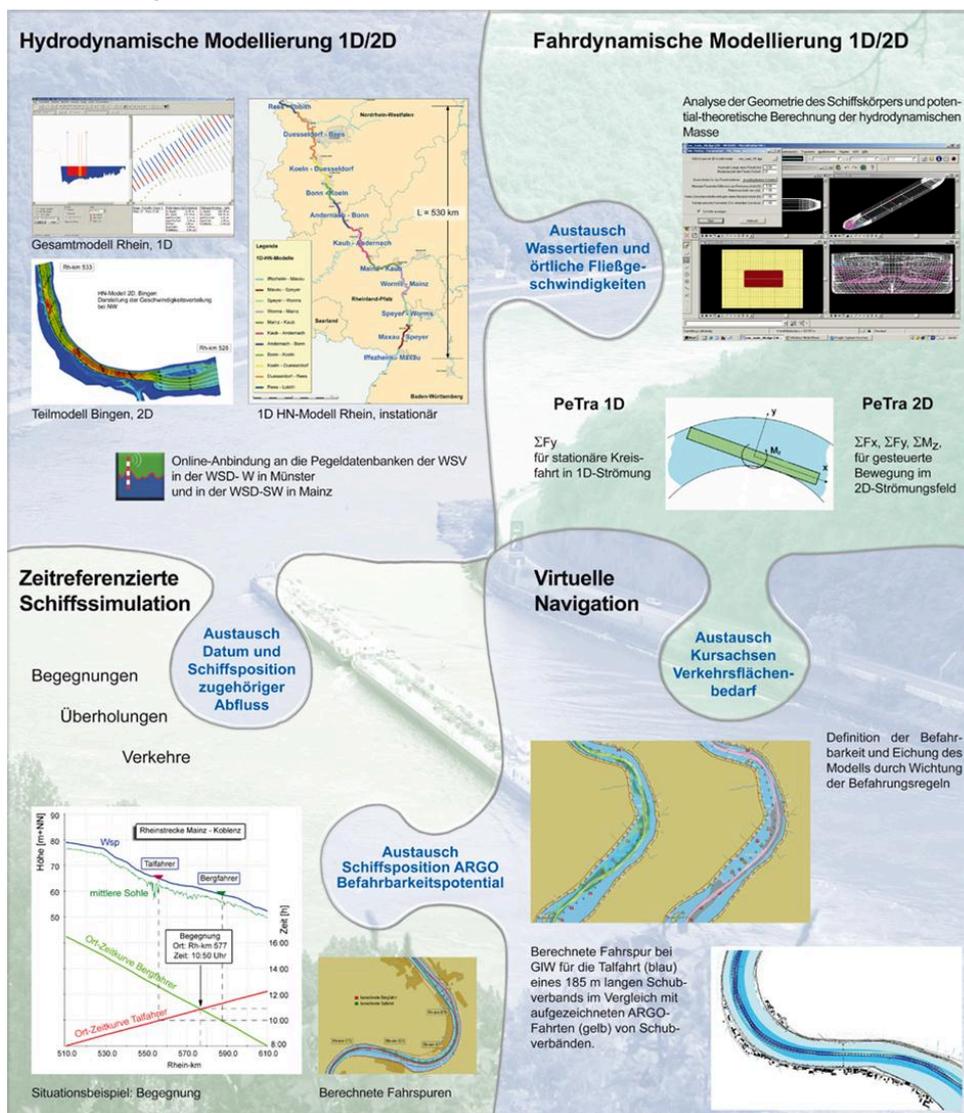


Bild 41: Zusammenspiel alle vier Modellkomponenten

6.1 Anwendungsbeispiel eindimensionaler Modellverfahren

Aus den EPA-Untersuchungen (Anlage 2; Engpassanalyse für den frei fließenden Rhein) sind Anwendungen für eine fahrdynamische Breiten- und Tiefenanalyse aus dem Mannheimer Bereich dargestellt /6.1/. Die fahrdynamische Analyse zeigt berechnete Fahrspuren eines Vierer-Schubverbandes (2-reihig-2-gliedrig) in der Berg- und in der Talfahrt (Bild 42).

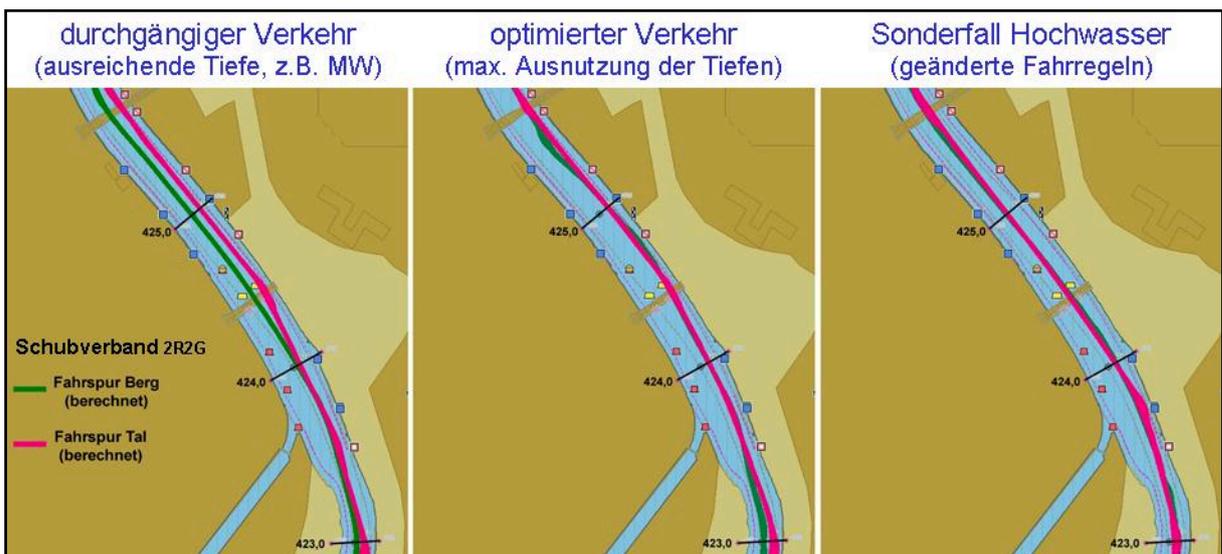


Bild 42: fahrdynamische Berechnung von Fahrspuren bei verschiedenen Wasserständen (Bereich Mannheim)

Im linken Bild wurden Fahrspuren berechnet, die die Schifffahrt für den durchgängigen Verkehr bevorzugt wählt. Hier sind die Brückendurchfahrten und das tiefere Wasser wesentliche Kriterien für die Kurswahl eines Schiffsführers. Die Mitte und der rechte Teil der Fahrrinne werden bevorzugt genutzt.

Im mittleren Bild wurden die Kurse bei voller Abladung für einen Niedrigwasserfall berechnet. Deutlich ist zu sehen, dass sowohl der Berg- als auch der Talfahrer die rechte Seite der Fahrinnen nutzen will.

Das rechte Bild zeigt die Navigation im Hochwasserfall. Hier gelten geänderte Fahrregeln. Die Schiffsführer sind gehalten, das mittlere Fahrwasser zu nutzen.

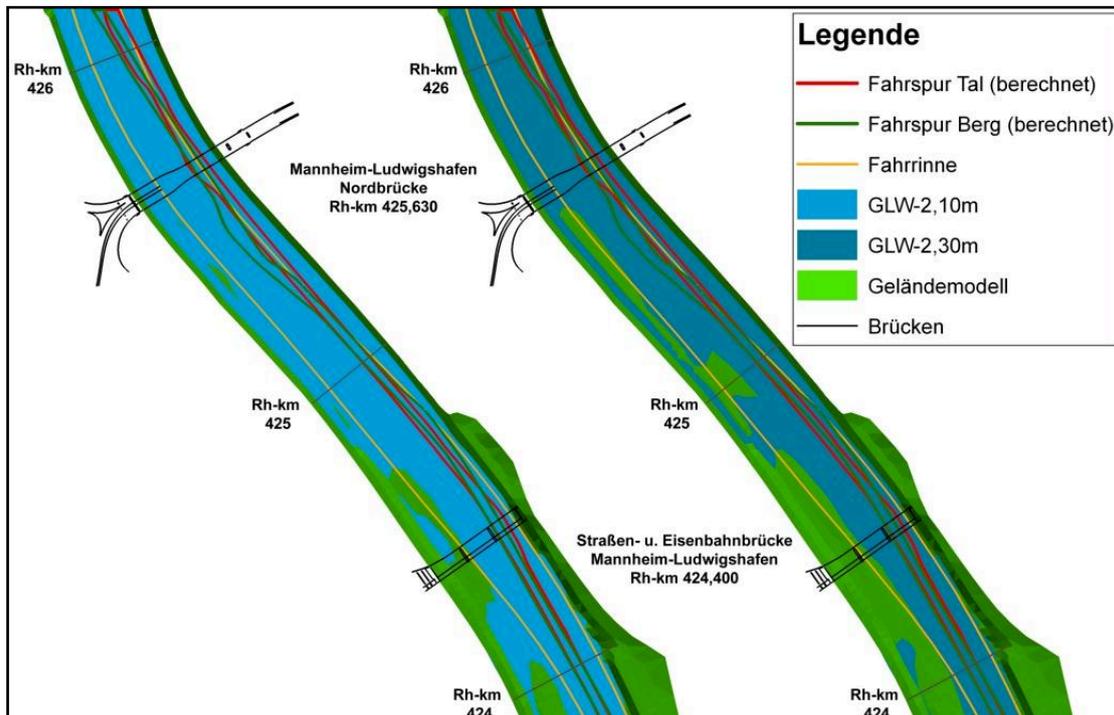


Bild 43: Tiefenverhältnisse bei GIW-2,10 m und GIW-2,30 m (Bereich Mannheim)

Die Tiefenanalyse in Bild 43 macht deutlich, dass Fehlstellen am linken Fahrinnenrand zuerst auftreten. Je mehr ein Schiffsführer das tiefe Wasser nutzen will, desto deutlicher wird er sich am rechten Fahrinnenrand orientieren müssen. Die Kombination von Brückendurchfahrt und Fehltiefen am linken Fahrinnenrand führen zu einer verdichteten Nutzung des rechten Fahrwassers durch den Berg- und Talverkehr.

6.2 Anwendungsbeispiel zweidimensionaler Modellverfahren

Das Verfahren PeTra 2D wurde erstmals für Untersuchungen zur Befahrbarkeit in der Weser im Bereich des Abzweiges zum oberen Schleusenkanal in Doerverden eingesetzt. In diesem Streckenabschnitt der Mittelweser kam es immer wieder zu Klagen durch die Schifffahrt, dass sowohl bei der Einfahrt in den Schleusenkanal als auch bei der Ausfahrt aus dem Schleusenkanal im Fall, dass die Mittelweser Hochwasser führt, sich die Befahrung des Mündungsbereiches als sehr schwierig gestaltet. Ursache ist, dass die Schiffe den Hauptströmungsbereich der Mittelweser kreuzen müssen und infolge der auftretenden Querströmung von dem beabsichtigten Kurs abweichen. Durch wasserbauliche Maßnahmen sollten die Ein- und Ausfahrtsverhältnisse für die Schifffahrt verbessert werden.

Bei den Untersuchungen wurde ein Bahnregler eingesetzt, der das Schiff entlang einer vorgegebenen Kursachse steuerte. Für die Fahrt aus der Weser in den Schleusenoberkanal wurden folgende Fahrparameter gesetzt:

Schiffstyp: GMS 110 m x 11,45 m
Tiefgang: 2,80 m
Propellerdrehzahl: 200 U/min
Startgeschwindigkeit: 2,2 m/s

Mit diesen Einstellungen wurde erreicht, dass das Schiff einerseits stabil von dem Bahnregler gesteuert werden konnte und andererseits mit halbwegs realistischen Geschwindigkeiten durch das Modell gefahren wurde. So erreichte es eine Geschwindigkeit von 3,2 m/s im Bereich der Kanaleinfahrt. Durch die geringe Propellerdrehzahl und das Fehlen der Strömung aus der Weser reduzierte sich die Fahrgeschwindigkeit im Kanal auf 2,2 m/s, was den Vorgaben aus den Schifffahrtspolizeiverordnungen entspricht.

Für die Einfahrt wurde eine Kursachse vorgegeben, die für die Beurteilung aller Ausbauvarianten genutzt wurde. Dabei wurde die Achse so gewählt, dass sie dicht an der Trennmole vorbeiführt, da erwartet wurde, dass sich dort der größte Einfluss der baulichen Veränderungen auf die Fahrspur zeigt.

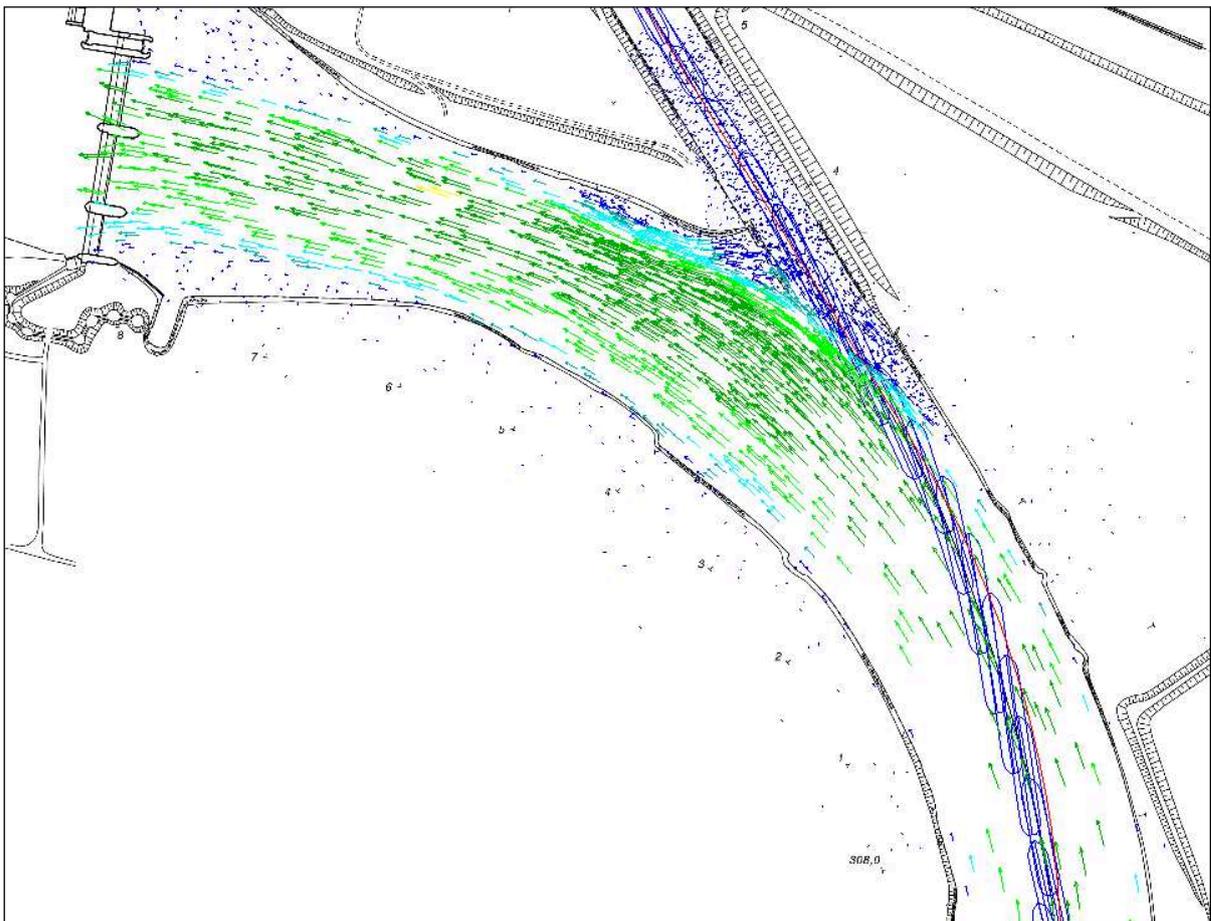


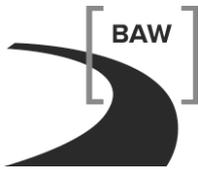
Bild 44: Einfahrt eines GMS in den Schleusenkanal bei der Ausgangsvariante V00

In Bild 44 ist beispielhaft die berechnete Kanaleinfahrt für die Ausgangsvariante V00 zu sehen. In diesem Bild sind die Strömungsvektoren dargestellt, eingefärbt je nach Größe ihres Betrages. Dabei geht die Farbpalette von dunkelblau für kleine Fließgeschwindigkeiten über hellblau, hellgrün bis dunkelgrün für hohe Fließgeschwindigkeiten. Die rote Linie stellt die Kursachse dar, auf der der Bahnregler versucht, das Schiff in den Kanal zu steuern. Die blauen Schiffssymbole bilden die Schleppkurve des fahrenden Schiffes. Es ist deutlich zu sehen, wie das Schiff vor Beginn der Kanaleinfahrt mit einer Drift dafür sorgt, dass es sich auf das rechte Ufer zu und damit in Richtung Kanaleinfahrt bewegt. Bei dem Übergang von der Weser in den Kanal erkennt man, wie das Heck für kurze Zeit in Stromrichtung gedreht wird. Letztendlich konnte für die Gestaltung des Mündungsbereiches des oberen Schleusenkanals eine Lösung erarbeitet werden, die in die Planungsarbeiten Eingang fand.

7 Bewertung der Ergebnisse und weiteres Vorgehen

Im Ergebnis der Forschungsarbeiten wurden die Verfahren PeTra 1D und PeTra 2D entwickelt. Bei diesen Verfahren handelt es sich um eine Vereinigung der vier Komponenten Flusshydraulik, Fahrdynamik, virtuelle Navigation und Zeitsteuerung der in der Simulation enthaltenen Schiffe. Beide Verfahren dienen der Trassierung von Fahrrinnen für Binnenschiffe und der Bewertung der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs (Befahrbarkeitsanalysen). Das Verfahren PeTra 1D wurde bereits bei der Bearbeitung von mehreren Projekten innerhalb der BAW erfolgreich eingesetzt. Mit Einführung der neuen „Richtlinien für Regelquerschnitte von Binnenschifffahrtskanälen“ Ausgabe 2011 / 7.1/ wurde in Absatz 21 in den zugehörigen Erläuterungen in der Anlage empfohlen, das Verfahren PeTra 1D für die Trassierung von Fahrrinnen in fließenden Gewässern einzusetzen. In einigen Ämtern wird dieses Verfahren bereits eigenverantwortlich eingesetzt. ***Damit ist die Entwicklung von dem Verfahren PeTra 1D abgeschlossen.***

In den bisher in der BAW und in der WSV eingesetzten Trassierungsverfahren spielt seit dem Trassierungsverfahren von Graewe, welches 1971 erstmals veröffentlicht wurde /2.2/, die Position des taktischen Drehpunktes an den Schiffen die entscheidende Rolle bei der Bestimmung des Verkehrsflächenbedarfs. In dem Verfahren PeTra 2D ist dies anders. In diesem Verfahren werden die Bewegungsgleichungen in der Ebene gelöst und die Bewegung des Schiffes inklusive der Ausbildung des Driftwinkels als Reaktion auf äußere Kräfte, die auf das Schiff wirken, bestimmt. Dies sind im Wesentlichen die Strömungskräfte, die auf den Schiffskörper wirken, und es sind die vom Schiff selbst initiierten Kräfte, wie der Propellerschub und die Ruderkräfte. Das bedeutet, bei der Fahrspurberechnung muss das Schiff gesteuert werden. Die bisherigen Kursachsen werden zu Leitlinien, die dem Schiffsführer oder einem Bahnführungssystem zur Orientierung dienen. Wird das Schiff durch einen Schiffsführer gesteuert, werden zusätzlich die Bedienelemente benötigt, über die der Schiffsführer

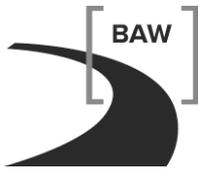


führer im Realfall das Schiff steuert. Darüber hinaus benötigt der Schiffsführer ein Sichtsystem, über das er sich in dem Fahrtrevier orientieren kann.

Derartige Entwicklungen sind nicht Kernaufgabe der BAW. Solche Systeme lassen sich auf dem Markt einkaufen. Mit der Bearbeitung des unter Kapitel 6.2 beschriebenen Projektes wurden die Entwicklungen an dem Verfahren PeTra 2D eingestellt. Die fehlenden Komponenten, wie die Bedienelemente und das Sichtsystem wurden ergänzt, in dem die BAW Karlsruhe im Jahr 2009 einen Binnenschiffsführungssimulator beschafft hat. Bei der Auswahl der auf dem Markt erhältlichen Simulatoren wurde u.a. darauf geachtet, dass die Software modular aufgebaut ist, so dass es möglich ist, Modellkomponenten im Simulator auszutauschen. Damit wird es möglich, den Simulator an den Entwicklungsbedarf der BAW anzupassen und die Modellverfahren der BAW in den Simulator zu integrieren. Die Weiterentwicklung des Simulators erfolgt seit dem Jahr 2009 in dem Forschungsvorhaben A39530470003.

8 Literaturverzeichnis

- /1/ 1998-Gründungspapier-Optimierung der Befahrbarkeit.pdf (BAW-intern)
- /2.1/ Richtlinien für Regelquerschnitte von Schifffahrtskanälen“, BMV- Erlass
BW24/BW23/BW28/52.05.00/16/VA94, 1994
- /2.2/ Graewe, H.: Beitrag zur Frage der Bemessung von Fahrwasserverbreiterungen in
Kanal- und Flusskrümmungen, Bautechnik 1/1971
- /2.3/ Dettmann, Th.: Ein Beitrag zur Berechnung von Fahrrinnenverbreiterungen in Kanal-
und Flusskrümmungen bei niedrigen Fließgeschwindigkeiten, Binnenschifffahrt
12/1998
- /2.4/ Dettmann, Th., Jurisch, R.: Die Berechnung der Fahrspurbreite eines Binnenschiffes
nach der Methode der Einzelpositionierung, Binnenschifffahrt 06/2001
- /3.1/ Hydrodynamisch-numerische Rheinmodelle von Iffezheim bis Lobith
(Rh-km 336,210 - 865,500)
- /3.2/ Zentgraf, R., Harlacher, D.: 1D-HN-Modelle Iffezheim-Lobith, Operatives Dynamisches
Modell, BAW-Bericht, September 2007
- /4.1/ Wien, W.: Vorlesungen über Mechanik von Gustav Kirchhoff, TH Aachen 1897
- /4.2/ Schnizer, B.: Analytische Mechanik, TU Graz, Januar 2003; Internet
- /4.3/ Lewis, F.: The inertia of water surrounding a vibration ship, Trans. Amer. Soc. Nav.
Ach.; 1929
- /4.4/ Puls, D.: Seemannschaft Teil3, Abschnitt 3.2, Berlin 1987
- /4.5/ Puls, D.: Theorie und Modellexperiment bei der Voraussage gesteuerter Schiffsbewe-
gungen, Univ. Rostock, Diss. B, 1977
- /4.6/ Kolarav, P., Dettmann, Th.: Entwicklung eines Modells zur Beschreibung der Fahrdy-
namik von Binnenschiffen in zweidimensionalen, tiefengemittelten Strömungsfeldern,
Binnenschifffahrt 05/2007
- /5.1/ Rheinschifffahrtpolizeiverordnung
- /5.2/ Kreische, V.: Handbuch Petra 1D, Mainhausen 2006
- /6.1/ Heinzemann, Ch., Dettmann, Th., Zentgraf, R.: Hydraulisch-fahrdynamische Modelle
zur Optimierung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen, Wasserwirtschaft 4/2009
- /7.1/ BMVBS, „Richtlinien für Regelquerschnitte von Binnenschifffahrtskanälen“ Ausgabe
2011



9 Unterlagen und Daten

WSA Freiburg:	BAW-Nr. A39530110039
WSA Mannheim:	BAW-Nr. A39530110024
WSA Bingen:	BAW-Nr. A39530110018
WSA Köln:	BAW-Nr. A39530110027
WSA Duisburg-Rhein:	BAW-Nr. A39530110047 Bericht September 2007

Bundesanstalt für Wasserbau
Karlsruhe, November 2014

Im Auftrag

.....
Dettmann

.....
Zentgraf

Universität Rostock
Fakultät für Maschinenbau
und Schiffstechnik
Lehrstuhl für Meerestechnik



Simulation von Schiffsbewegungen im Fließgewässer

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR

dem Fakultätsrat der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik der Universität
Rostock vorgelegt

von

Dipl.-Ing. Petre Kolarov
geboren am 28.06.1976 in Varna, Bulgarien

Rostock, 2006

Gutachter

Prof. Dr.-Ing. Mathias Paschen - Universität Rostock, Lehrstuhl für Meerestechnik

Prof. Dr.-Ing. Moustafa Abdel-Maksoud - Universität Duisburg-Essen, Institut für
Schiffstechnik und Transportsysteme (IST)

BDir Prof. Dr.-Ing. Bernhard Söhngen - Bundesanstalt für Wasserbau - Karlsruhe

Erklärung

Hiermit erkläre ich, Petre Kolarov, die vorliegende Arbeit selbstständig nach bestem Wissen und mit den vorliegenden Informationen erarbeitet zu haben. Alle Quellen und Hilfsmittel sind ordnungsgemäß angegeben.

Rostock, im Mai 2006

Petre Kolarov

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Meerestechnik an der Universität Rostock im Rahmen meiner Aktivitäten im gleichnamigen Forschungsprojekt.

Die Arbeit fasst die Ergebnisse systematischer Modellexperimente und numerischer Analysen über das Bewegungsverhalten von Binnenschiffen in fließendem Gewässer zusammen. Sie ordnet sich somit ein in die seit Jahrzehnten in Rostock entstandenen Arbeiten auf dem Gebiet der Steuerbarkeit und des Manövrierens von Schiffen.

Die theoretischen Untersuchungsergebnisse stellen eine Erweiterung des bisherigen Wissens auf dem Gebiet der Steuerbarkeit von Binnenschiffen insbesondere beim Manövrieren in Fließgewässern mit unregelmäßig verteilter Fließgeschwindigkeit dar.

Die experimentellen Untersuchungen bilden das Fundament für die Validation des im Rahmen des Forschungsvorhabens entstandenen fahrdynamischen Modells PeTra2D.

Im Verlauf der Bearbeitung des Forschungsvorhabens konnten zusätzlich zu den geplanten Zielstellungen Erkenntnisse über den Einfluss der begrenzten Wassertiefe auf die auf den Schiffskörper wirkenden hydrodynamischen Lasten gewonnen werden.

Danksagung

Besonderer Dank gilt meinem Betreuer, Prof. Mathias Paschen, der mich über die Jahre fachlich wie menschlich unterstützt und gefördert hat und mir das Arbeiten in einer stets kollegialen Atmosphäre mit immer neuen Herausforderungen ermöglichte.

Den Herren Prof. Bernhard Söhngen und Thorsten Dettmann von der Bundesanstalt für Wasserbau sei für die wertvollen Anregungen zu dieser Arbeit sowie die stets gute Kooperation inklusive der freundlichen Bereitstellung ihrer Messergebnisse gedankt.

Weiterhin danke ich allen Kollegen vom Lehrstuhl für Meerestechnik, insbesondere Sebastian Schreier für seine kritischen Korrekturen und wertvollen Kommentare. Meinen ehemaligen Kommilitonen Jürgen Siegl, Michael Zimmermann und Nils Tönnißen danke ich für die Durchsicht der Reinschrift.

Schließlich bedanke ich mich bei meiner Freundin Maria Lins und ihrer Familie (Christine und Michael) für die Unterstützung und dafür, dass ich mich in einem Land fern meiner Heimat zu Hause fühle.

Тази работа се посвещава на Елена и Тодор Коларови с благодарност за всичко, което те направиха за мен!

Inhalt

Symbolverzeichnis.....	VII
Bilderverzeichnis	X
1 Einleitung.....	1
2 Mathematisches Modell.....	9
2.1 Bewegungsgleichungen im ruhenden Wasser.....	9
2.2 Bewegung eines Schiffes im Strom	11
3 Koeffizienten im mathematischen Modell	16
3.1 Massenkoeffizienten.....	16
3.1.1 Definition	16
3.1.2 Ermittlung der hydrodynamischen Massen und Trägheitsmomente....	17
3.2 Kraftkoeffizienten.....	22
3.2.1 Definition	22
3.2.2 Ermittlung des Querkraft- und des Giermomentbeiwerts	29
3.3 Implementierung der Koeffizienten im mathematischen Modell	33
4 Modellversuche	39
4.1 Modellversuche im Windkanal.....	39
4.1.1 Versuchsaufbau	42
4.1.2 Versuchsergebnisse, Vergleich mit berechneten Kraft- und Momentenbeiwerten.....	47
4.2 Modellversuche in der Längsschlepprinne	53
4.2.1 Messkonzept.....	54
4.2.2 Auswertung der Rohdaten	61
4.2.3 Messergebnisse	66
5 Bewegungssimulationen.....	71
5.1 Nachrechnung der Modellmessfahrt.....	74
5.2 Simulationsrechnungen für die Binger-Loch-Strecke	78
6 Zusammenfassung	93
7 Literatur	96
Anhang: Formeln zur Berechnung der Kraftkoeffizienten	101

Symbolverzeichnis

A_0	- Fläche
A_L	- Lateralfäche
B	- Breite
$C(x)$	- Lewisscher Trägheitskoeffizient
c_x	- Längskraftbeiwert
C_n, c_n	- Momentenbeiwert
C_y, c_y	- Querkraftbeiwert
$C_w(x)$	- Querwiderstandsbeiwert
D_{S_z}	- Drehimpuls der Strömung
F_x, F_y	- Kraft in x- bzw. y-Richtung
F_R	- Ruderkraft
H	- Wassertiefe
I_z	- Trägheitsmoment
I_{hz}	- hydrodynamisches Trägheitsmoment
L	- Länge
L_{MS}	- Länge des Mittelschiffes
m	- Schiffsmasse
m_x, m_y	- hydrodynamische Masse in Schiffslängs- bzw. Querrichtung
$\bar{m}_y(x)$	- hydrodynamische Massenverteilung
$\bar{m}_y^{DS}(x)$	- hydrodynamische Massenverteilung eines Doppelschiffes
M_z	- Moment um die Hochachse
N	- Moment um die Hochachse
N_H	- Drehmoment am Schiffsrumpf
N_{HC}	- Drehmoment am Schiffsrumpf infolge Cross-Flow-Effects
N_{HL}	- Drehmoment am Schiffsrumpf infolge reiner Queranströmung
N_P	- Drehmoment infolge Propellerwirkung

N_R	- Drehmoment infolge Ruderwirkung
N_S	- Drehmoment infolge äußerer Strömung
n_P	- Propellerdrehzahl
P_{Sx}, P_{Sy}	- Impuls der Strömung in Schiffslängs- bzw. Querrichtung
R_T	- Schiffswiderstand
T	- Tiefgang
t	- Zeit
U	- seitliche Anströmgeschwindigkeit
V	- Schiffsgeschwindigkeit im raumfesten Koordinatensystem
V_A	- Anströmgeschwindigkeit
v_x, v_y	- Komponente der Schiffsgeschwindigkeit
V_{Sx}	- Strömungsgeschwindigkeit in Schiffslängsrichtung
$V_{Sy}(x)$	- Strömungsgeschwindigkeit in Schiffsquerrichtung
V_{Sx0}, V_{Sy0}	- Komponenten der Strömungsgeschwindigkeit in dem globalen Koordinatensystem
X	- Längskraft
X_H	- Längskraft am Schiffskörper
X_{HL}	- Längskraft am Schiffskörper infolge reiner Queranströmung
X_P	- Längskraft infolge Propellerwirkung
X_R	- Längskraft infolge Ruderwirkung
x, y, z	- Koordinaten des körperfesten Bezugssystems: Das System ist ein Rechtssystem, der Ursprung ist in der ungestörten Wasseroberfläche im gemeinsamen Schwerpunkt aus Schiffsmasse und hydrodynamischen Massen; die x-Achse zeigt positiv nach vorn, die z-Achse nach oben
x_0, y_0, z_0	- Koordinaten des raumfesten Bezugssystems: Das System ist ein Rechtssystem; die z_0 -Achse zeigt positiv nach oben, die x_0, y_0 -Ebene liegt in der ungestörten Wasseroberfläche.
x_w, y_w, z_w	- Koordinaten des raumfesten Bezugssystems einer 6-Komponenten-Waage: Das System ist ein Rechtssystem.
Y	- Querkraft

Y_H	- Querkraft am Schiffsrumpf
Y_{HC}	- Querkraft am Schiffsrumpf infolge Cross-Flow-Effects
Y_{HL}	- Querkraft am Schiffsrumpf infolge reiner Queranströmung
Y_P	- Querkraft infolge Propellerwirkung
Y_R	- Querkraft infolge Ruderwirkung
Y_S	- Querkraft am Schiffsrumpf infolge äußerer Strömung
α	- Anströmwinkel
β	- Gierwinkel
δ_R	- Ruderwinkel
ε	- Faktor zur Berücksichtigung einer teilweisen Impulsrücklenkung
ε_{Bug}	- Faktor zur Berücksichtigung einer teilweisen Impulsrücklenkung im Bugbereich
φ	- Störpotenzial
$\kappa_x, \kappa_y, \hat{\kappa}_x, \hat{\kappa}_y$	- Massenkoeffizienten (inklusive hydrodynamische Masse)
$\mu, \hat{\mu}$	- Trägheitskoeffizienten (inklusive hydrodynamisches Trägheitsmoment)
ρ	- Wasserdichte
ρ_L	- Luftdichte
τ	- dimensionslose Zeit
Ω	- dimensionslose Bahnkrümmung (dimensionslose Winkelgeschwindigkeit)
ω	- Winkelgeschwindigkeit
ψ	- Kurswinkel

Alle hier nicht aufgeführten Bezeichnungen haben nur lokalen Charakter und sind in dem jeweiligen Abschnitt erklärt, in dem sie gebraucht werden. Sie können in verschiedenen Abschnitten mit verschiedenen Bedeutungen gebraucht werden.

Bilderverzeichnis

Bild 2.1 Koordinatensysteme und Bezeichnungen für die Bewegung in einer horizontalen Ebene	9
Bild 3.1 Koordinatensystem für die Berechnung der hydrodynamischen Masse	19
Bild 3.2 Unterteilung der Rumpfkkräfte.....	26
Bild 3.3 Strömung am Ruder	27
Bild 4.1 Versuchsstand und Koordinatensysteme im Windkanal	42
Bild 4.2 Geschwindigkeitsprofile bei $x_w = 900\text{mm}; y_w = 0$	44
Bild 4.3 Geschwindigkeitsprofile bei $x_w = 0; y_w = 0$	44
Bild 4.4 Versuchsstand, Ansicht von oben (ohne die obere Platte, Abmessungen in mm)	45
Bild 4.5 Versuchsaufbau für die Messung des Querwiderstandes.....	46
Bild 4.6 Querkraftbeiwert	47
Bild 4.7 Momentenbeiwert	48
Bild 4.8 Querwiderstandsbeiwert in Abhängigkeit von der Reynoldszahl und von dem Abstand zwischen den Platten	49
Bild 4.9 Querwiderstandsbeiwert in Abhängigkeit von H/T bei $Rn = 1 \cdot 10^5$	49
Bild 4.10 Einfluss der Länge der Seitenplatten auf die Messergebnisse bei $H = 42$ mm	50
Bild 4.11 Vergleich von theoretischen und experimentellen Werten für den Momentenbeiwert.....	51
Bild 4.12 Vergleich von theoretischen und experimentellen Werten für den Querkraftbeiwert.....	52
Bild 4.13 Versuchsaufbau und Koordinatensystem	56
Bild 4.14 Versuchsaufbau. Ansicht von vorne	56
Bild 4.15 Versuchsaufbau. Ansicht von oben	57
Bild 4.16 Schiffsmodell mit Abmessungen (in [mm]).....	58
Bild 4.17 Schiffsmodell mit Aufbauten	59
Bild 4.18 Strömungsverhältnisse im Messbereich	60
Bild 4.19 Eingangsvideobild mit den beiden hellen Bildpunkten	61
Bild 4.20 Schwarz-Weiß-Videobild nach der Graustufenanalyse für die digitale Bildauswertung.....	62

Bild 4.21 Raster	62
Bild 4.22 Gemessene Modellbahn bei $V_0 = 0,7$ m/s	67
Bild 4.23 Gemessene Gierwinkel und Bahnkrümmung bei $V_0 = 0,7$ m/s.....	67
Bild 4.24 Gemessene Kurswinkel und Modellgeschwindigkeit bei $V_0 = 0,7$ m/s.....	68
Bild 4.25 Gemessene Modellbahn bei $V_0 = 0,8$ m/s	68
Bild 4.26 Gemessene Gierwinkel und Bahnkrümmung bei $V_0 = 0,8$ m/s.....	69
Bild 4.27 Gemessene Kurswinkel und Modellgeschwindigkeit bei $V_0 = 0,8$ m/s.....	69
Bild 5.1 Hauptfenster des Computerprogramms.....	72
Bild 5.2 Hauptfenster des Echtzeitsimulators	73
Bild 5.3 Hydrodynamische Massenverteilung des Schiffmodells bei $T = 28$ mm und $H = 40$ mm	75
Bild 5.4 Simulierte (blau) und gemessene (schwarz) Modellbahnen	76
Bild 5.5 Berechnete und gemessene Gierwinkel β und Bahnkrümmung Ω	76
Bild 5.6 Strömungsverhältnisse auf der Binger-Loch-Strecke.....	79
Bild 5.7 Strömungsverhältnisse in der Nähe der Nahemündung	79
Bild 5.8 Simulationsrechnung Talfahrt und Bergfahrt ohne Strömung	81
Bild 5.9 Simulationsrechnung Talfahrt und Bergfahrt mit Strömung	81
Bild 5.10 Gierwinkel auf der Talfahrt.....	83
Bild 5.11 Bahnkrümmung auf der Talfahrt	83
Bild 5.12 Gierwinkel auf der Bergfahrt	84
Bild 5.13 Bahnkrümmung auf der Bergfahrt.....	84
Bild 5.14 Schiffsbahnen und Strömungsverhältnisse bei $9 \leq \tau \leq 16$ auf der Talfahrt (oben) und $35,5 \leq \tau \leq 42,5$ auf der Bergfahrt (unten).....	86
Bild 5.15 Schiffsbahnen und Strömungsverhältnisse bei $16 \leq \tau \leq 23$ auf der Talfahrt (oben) und $28,5 \leq \tau \leq 35,5$ auf der Bergfahrt (unten).....	87
Bild 5.16 Gemessene und simulierte Schiffsspuren auf der Binger-Loch-Strecke....	89
Bild 5.17 Berechneter und gemessener Gierwinkel auf der Bergfahrt	90
Bild 5.18 Berechneter und gemessener Gierwinkel auf der Talfahrt.....	90
Bild 5.19 Gemessene (oben) und simulierte (unten) Schiffsspur bei $20 < \tau < 27$	91
Bild 5.20 Strömungsverteilung bei $\tau = 23$	92

1 Einleitung

Ein wichtiger Aspekt bei der Wartung und dem Ausbau von Binnenwasserstraßen ist die Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Schiffsverkehrs. Mit der Entwicklung moderner Binnenschiffe ergeben sich neue Fragestellungen bezüglich der Zulassung größerer Schiffseinheiten, der Einschätzung der Leichtigkeit und Sicherheit des Schiffsverkehrs und der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen. Die Kenntnis des Platzbedarfs für die Durchführung notwendiger Manöver von einem gegebenen Schwimmkörper ist Voraussetzung für die Erstellung von Befahrbarkeitsanalysen, die solche Fragestellungen beantworten sollen.

Eine Wasserstraße wird durch den Gewässerboden und die Ufer begrenzt. Unter Berücksichtigung von Sicherheitszuschlägen ergeben sich daraus Mindestanforderungen für den Platzbedarf eines einzelnen Schiffes, die zwingend einzuhalten sind.

Der von einem manövrierenden Schiff benötigte Raum ist neben der Schiffsform und den Schiffsabmessungen auch von den Bewegungsgrößen des Schiffes wie Geschwindigkeit und Drehgeschwindigkeit abhängig [Dettmann, 2002]. Die Charakteristika jeder Bewegung werden von den an der Bewegung beteiligten Kräften bestimmt. Diese Kräfte sind wiederum abhängig einerseits von der Form und des Schiffes und seiner Steuerorgane sowie andererseits von den Bedingungen in der Wasserstraße. Zu diesen Bedingungen zählen Verlauf und Abmessungen der Wasserstraße sowie die Wind- und Strömungsverhältnisse. Alle diese Faktoren müssen bei einer theoretischen Ermittlung des Platzbedarfes berücksichtigt werden.

Aus der großen Anzahl der verschiedenen Schiffstypen, die auf den Binnenwasserstraßen verkehren, und deren Beladungszustände ergibt sich eine Vielzahl von Einflussparametern. Diese Vielzahl stellt erhebliche Anforderungen an die Komplexität und die Flexibilität der mathematischen Modelle zur Berechnung des Platzbedarfs. Da die Gewässerströmung in der Regel unregelmäßig im Raum verteilt ist, müssen die hierfür eingesetzten Methoden diesen Umstand berücksichtigen. Gleichzeitig ist bei dem Einsatz der Lösungsmethoden auf geringen Zeitaufwand zu achten.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine Methode zu entwickeln, die die Berechnung des Platzbedarfes von konventionellen Schiffen unter Berücksichtigung der obigen Anforderungen ermöglicht. Dazu ist die Berechnung der Charakteristika der gesteuerten Schiffsbewegungen unter Berücksichtigung eines unregelmäßigen Strömungsfeldes notwendig.

Die theoretische Berechnung der Charakteristika einer gesteuerten Schiffsbewegung erfolgt in der Regel mithilfe von Bewegungssimulationen. Grundlage für diese Bewegungssimulationen sind Bewegungsgleichungen, die das Kräfte- und Momentengleichgewicht zwischen den Trägheitskräften und -momenten und den Kräften und Momenten infolge Zähigkeit, Wirbelbildung, Wellenbildung, Wind, Strom usw. beschreiben [Abkowitz, 1964] [Schmitz, 1961].

Die Lösung der Gleichungen bereitet keine nennenswerten Schwierigkeiten, wenn die hydrodynamischen Kräfte und Momente bekannt sind. Diese resultieren aus den Druckgradienten, die sich infolge der Umströmung des Körpers auf seiner Oberfläche ausbilden. Die Umströmung eines Schiffskörpers und somit die äußeren Kräfte sind einerseits abhängig von den Eigenschaften des Schiffes und seinen Propulsions- und Steuerorganen sowie andererseits von den Charakteristika der Wasserstraße. Zur ersten Gruppe gehören die Form des Schiffes und seiner Steuerorgane sowie die Geschwindigkeit, die Drehgeschwindigkeit, der Ruderwinkel und die Propellerdrehzahl. Zu der zweiten Gruppe zählen die Tiefe und die Breite der Wasserstraße, die Gewässerströmung sowie die Windverhältnisse.

Die meisten bisher veröffentlichten Methoden zur Schiffsbewegungssimulation berücksichtigen hauptsächlich die Einflussfaktoren aus der ersten Gruppe. Der Einfluss der Wassertiefe ist in mehreren Publikationen ausreichend diskutiert worden [Kleinau, 1985], [Zhao, 1986], [Gronarz, 1997] [Mutzke, 1994], [Kijima, 2004]. Wenig untersucht wurde der Einfluss der Gewässerströmung. Aufgabe der vorliegenden Arbeit ist es diese Thematik aufzugreifen und durch die Erweiterung der schon existierenden theoretischen Modelle, einen Beitrag zur qualitativ besseren Vorhersage von Schiffsbewegungen in Fließgewässern zu leisten. Dabei steht die Berücksichtigung von einer zweidimensionalen Gewässerströmung im Mittelpunkt der Betrachtungen.

Im Folgenden wird eine kurze Übersicht über die veröffentlichten Methoden zur Berechnung der an einer gesteuerten Schiffsbewegung beteiligten Kräfte gegeben.

Aus der Literatur sind Ansätze und Methoden zur Berechnung der Kräfte bei tiefem Wasser seit langem bekannt [Abkowitz, 1964], [Oltmann/Sharma, 1984], [Schmitz, 1961, 1980], [Puls, 1977, 1987], [Wolf, 1981]. Die Trägheitswirkungen der Flüssigkeit werden durch hydrodynamische Massen dargestellt [Puls, 1977]. Die äußeren Kräfte infolge Zähigkeit und Wirbelbildung werden auf der Grundlage verschiedener mathematischer Modelle (Potenzialtheorie [Schmitz, 1961], [Puls, 1977, 1987], Navier-Stokes-Gleichungen [El Moctar, 2001]) und Ergebnisse von Modellversuchen näherungsweise bestimmt.

Der Einfluss einer beschränkten Wassertiefe auf die an einem Frachtschiff angreifenden hydrodynamischen Kräfte wird bereits seit Anfang der fünfziger Jahre auf Grundlage von Modellversuchen diskutiert [Kleinau, 1986]. In den vergangenen Jahren wurden umfangreiche theoretische und experimentelle Untersuchungen auf dem Gebiet der Steuerbarkeit von Binnenschiffen unter Berücksichtigung des Einflusses der beschränkten Wassertiefe durchgeführt [Kleinau, 1985], [Zhao, 1986], [Gronarz, 1997], [Mutzke, 1994], [Kijima, 2004]. Dabei wird mithilfe verschiedener theoretischer Ansätze und durch Auswertung von Messergebnissen der Einfluss der Wassertiefe sowohl auf die Trägheitskräfte als auch auf die Kräfte infolge Zähigkeit und Wirbelbildung untersucht. Die Kräfte werden analog zu der Betrachtung im tiefen Wasser auf Grundlage von verschiedenen physikalischen Modellen [Kleinau, 1986], [Zhao, 1986], [Gronarz, 1997] und Ergebnissen von Modellversuchen [Gronarz 1997], [Mutzke 1994], [Kijima, 2004] näherungsweise bestimmt.

Methoden zur Berücksichtigung des Einflusses der Strömung auf den Schiffswiderstand sind von [Schneekluth, 1988] veröffentlicht worden. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Strömung des Fließgewässers in Schiffslängsrichtung konstant über die gesamte Schiffslänge ist. Der Einfluss der Strömung wird durch eine Verminderung bzw. Erhöhung der Schiffsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der relativen Richtung des Stromes zur Schiffsbewegungsrichtung erfasst.

Ansätze für die Berücksichtigung von einer Gewässerströmung mit konstanter Geschwindigkeitsverteilung bei der Vorhersage von Schiffsbewegungen sind in [Vasilev, 1989] veröffentlicht. Der Einfluss eines richtungs- und geschwindigkeitskonstanten Stromes auf die Bewegungen des Schiffes wird demnach auf einen Versatz des sich beliebig bewegenden Schiffes mit der Strömungsgeschwindigkeit reduziert. Bei der Bewegung des Schiffes auf einer Kreisbahn wird eine fiktive Zentrifugalkraft eingeführt, die nur von der Strömungs- und der Schiffsgeschwindigkeit abhängig ist. Dabei wird die Strömungsgeschwindigkeit als konstant und parallel zu der Kreisbahn eingesetzt. Einige Ergebnisse von Berechnungen, die mit diesem Ansatz durchgeführt wurden, sind in [Perschic, 1983] veröffentlicht. Sie zeigen eine deutliche Erhöhung des Platzbedarfes bei Fahrt mit der Strömung und eine Verminderung bei Fahrt gegen die Strömung.

Eine Erweiterung der Bewegungsgleichungen hinsichtlich der Berücksichtigung des Einflusses der Gewässerströmung wurde von [Chislett, Wied, 1985] vorgestellt. Für die Bewegung im geschwindigkeitskonstanten Strom werden in den Bewegungsgleichungen zusätzliche Trägheitskräfte eingeführt, die durch die Gewässerströmung bedingt sind. Bei einer Bewegung im konstanten Strom bildet sich eine ähnliche Umströmung des Schiffskörpers wie bei Bewegung im ruhenden Wasser aus. Daher können nach [Chislett, Wied, 1985] die äußeren Kräfte mithilfe derselben Methoden ermittelt werden, die auch bei ruhendem Wasser zum Einsatz kommen. Bei einer örtlich veränderlichen Gewässerströmung wird das so genannte Querströmungswiderstandskonzept (Cross-Flow-Drag Concept) [Oltmann, Sharma, 1984], [Gronarz, 1997] angewendet. Dabei wird die Kraft an jedem Spant mithilfe eines Querwiderstandsbeiwertes und der jeweiligen Querstromgeschwindigkeit berechnet.

Nach [Oltmann, Sharma, 1984] werden die äußeren Kräfte auf den Schiffskörper in Auftriebskräfte aufgrund einer reinen Schräganströmung und Kräfte infolge der ebenen Queranströmung der einzelnen Schiffsspanten unterteilt. Das Querströmungswiderstandskonzept dient ausschließlich zur Berechnung der Kräfte aus der zweiten Gruppe.

Die Vorhersage von Schiffsbewegungen im Strom wurde von [Korte, 2002] untersucht. Die zusätzlichen Kräfte infolge Strömung wurden mithilfe der Theorie des schlanken Körpers unter Einsatz des Querströmungswiderstandskonzepts berechnet (siehe [Chislett, Wied, 1985]). Zusätzliche Trägheitskräfte infolge der Bewegung im Strom wurden von [Korte, 2002] nicht berücksichtigt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass bisher in der Literatur fast ausschließlich Bewegungsanalysen bei konstantem Strom behandelt werden. Dabei wird in den meisten Fällen nur der Einfluss der Gewässerströmung auf die äußeren Kräfte berücksichtigt. Der Einfluss der Strömung auf die Trägheitskräfte ist von [Chislett, Wied, 1985] untersucht worden. Dabei gehen die Autoren von einem konstanten Strom aus. Der Einfluss einer über die Schiffslänge veränderlichen Strömung auf die Trägheitskräfte ist in der Literatur nach Kenntnis des Autors noch nicht behandelt worden.

Die Berechnung der äußeren Kräfte mit dem Querströmungswiderstandskonzept ist nicht ausreichend, da das Konzept nur die so genannten Querströmungseffekte berücksichtigt. Die Auftriebskräfte [Gronarz, 1997], die in der Regel den größeren Anteil der Rumpfkkräfte in Schiffsquerrichtung darstellen, werden bisher bei der Berechnung der äußeren Kräfte im unregelmäßigen Strom gänzlich vernachlässigt.

Basierend auf den schon existierenden physikalischen Modellen wird in dieser Arbeit der Einfluss einer unregelmäßigen Strömung auf das Bewegungsverhalten eines Schiffes theoretisch und experimentell untersucht. Zunächst werden die Bewegungsgleichungen des Schiffes um die hydrodynamischen Impulse der unregelmäßigen Strömung erweitert und somit die Trägheitswirkung der Strömung berücksichtigt. Weiterhin werden Methoden untersucht, mit denen die durch Zähigkeit und Wirbelbildung bedingten äußeren Kräfte und Momente berechnet werden können.

Um den Anforderungen der Zielstellung gerecht werden zu können, werden die folgenden grundsätzlichen Annahmen getroffen:

1. Das Schiff führt gesteuerte Bewegungen in einem Fließgewässer aus, Grundlage für die Simulation sind die Bewegungsgleichungen.

2. Bei den Untersuchungen zum Manövrierverhalten wird von gesteuerten Bewegungen in der Ebene der glatten Wasseroberfläche ausgegangen.
3. Die Gewässerbreite ist ausreichend groß, so dass die Randeffekte der Uferzone vernachlässigt werden können.
4. Die Untersuchungen konzentrieren sich ausschließlich auf solche Fälle, die die unmittelbare Nähe weiterer Schiffe ausschließen.
5. Die natürliche Strömungsverteilung im Fließgewässer kann als zeitlich konstant betrachtet werden. Sie ist bekannt und durch die über die Wassertiefe gemittelte, zweidimensionale Verteilung mathematisch hinreichend genau beschreibbar.
6. Ausgehend von der Theorie schlanker Körper können die hydrodynamischen Massen mit dem potenzialtheoretischen Paneelverfahren berechnet werden.
7. Der Einfluss des Windes spielt bei den Bewegungen von Binnenschiffen häufig eine untergeordnete Rolle; er bleibt in dieser Arbeit unberücksichtigt.
8. Die am Schiff wirkenden hydrodynamischen Kräfte sind eine unmittelbare Folge von Relativbeschleunigungen und -geschwindigkeiten zwischen dem Fluid und dem gesteuerten Schiff.

Die Aufgabe besteht im Folgenden darin, die Kräfte unter dem Einfluss einer zweidimensionalen Strömung zu beschreiben, die Bewegungsgleichungen zu lösen, deren Ergebnisse durch Modellexperimente zu validieren und zu diskutieren.

Grundsätzlich ist es möglich mithilfe von Methoden der numerischen Strömungsmechanik (CFD), wie beispielsweise der Finite-Volumen-Methode (FVM), die vollständige räumliche Umströmung um einen Schiffskörper zu berechnen und somit durch eine Integration der Druckverteilung die Kräfte und Momente auf den Schiffsrumpf zu bestimmen.

Bei Bewegung eines Körpers im Fließgewässer resultiert die Umströmung einerseits aus der Bewegung des Schiffes sowie andererseits aus der Gewässerströmung. Aus der Vielfalt der Strömungssituationen in den Fließgewässern ergibt sich eine enorme Anzahl von Umströmungsvarianten. Bei der FVM muss für jede gegebene Umströmungssituation eine neue Berechnung durchgeführt und ggf. ein neues numerisches Netz erzeugt werden. Beides ist nach wie vor (Stand 2006) sehr

zeitintensiv, obwohl in den letzten Jahren die Leistung der Rechentechnik enorm gestiegen ist. Aufgrund dieser Tatsache erscheint die FVM ungeeignet für die Zwecke dieser Arbeit.

Zur Bestimmung der äußeren Kräfte, die durch eine unregelmäßige Strömung verursacht werden, wird in dieser Arbeit auf das Impulsverfahren [Schmitz, 1961] und das Querströmungswiderstandskonzept [Oltmann, Sharma, 1984] zurückgegriffen. In beiden Fällen handelt es sich um Näherungsverfahren. Bei der Berechnung der äußeren Kräfte infolge unregelmäßiger Strömung wird davon ausgegangen, dass die an dem Schiffsrumpf angreifenden äußeren Kräfte in Auftriebskräfte und Kräfte infolge Querwiderstandseffekte unterteilt werden können [Oltmann, Sharma, 1984]. Dabei handelt es sich um Lasten, die in der Bewegungsebene wirken. Von oben gesehen ähnelt die Umströmung eines sich unter Gierwinkel bewegenden Schiffes der eines Tragflügels. Daher rührt auch die vorgestellte Unterteilung der Kräfte. Die Auftriebskräfte resultieren aus der Anströmung des Schiffskörpers unter dem Gierwinkel. Die Widerstandskräfte in Schiffsquerrichtung resultieren aus der Queranströmung der einzelnen Schiffsspannten. Weiterhin wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass die Querkomponente der so genannten Auftriebskräfte mithilfe des Impulsverfahrens [Schmitz, 1961] mit ausreichender Genauigkeit berechnet werden kann. Die Querwiderstandskräfte werden, genau wie bei [Chislett, Wied, 1985] und [Korte, 2002], unter Einsatz des Querströmungswiderstandskonzepts berechnet. Die beiden Methoden wurden gewählt, da sie die formelle Berücksichtigung einer unregelmäßigen Strömung erlauben. Im Gegensatz zu [Chislett, Wied, 1985] und [Korte, 2002] werden mithilfe des Impulsverfahrens auch die Auftriebskräfte infolge einer über die Schiffslänge veränderlichen Strömung berücksichtigt. In den beiden zuvor genannten Arbeiten werden sie nicht berücksichtigt.

In dem folgenden Kapitel 2 wird das mathematische Modell dargestellt.

Die eingesetzten Methoden zur Berechnung der auf den Schiffskörper wirkenden Kräfte werden mithilfe von Modellversuchen im Windkanal der Universität Rostock validiert. Der Versuchsaufbau und die Messergebnisse werden im Kapitel 4 dargestellt, Ergebnisse werden diskutiert.

Um den Sonderfall „Durchfahrt eines Schiffes durch einen Flussabschnitt mit einem natürlichen Zufluss“ untersuchen und das mathematische Modell überprüfen zu können, werden in der Strömungshalle der Universität Rostock entsprechende Freifahrtversuche durchgeführt. Der entwickelte Versuchsstand sowie der Versuchsablauf werden ebenfalls im Kapitel 4 dargestellt und diskutiert.

Einige Ergebnisse von Bewegungssimulationen sind im Kapitel 5 dargestellt. Dabei wird ein Vergleich zwischen den durch die Freifahrtversuche ermittelten und den durch Bewegungssimulation generierten Freifahrtmodellbahnen dargestellt und diskutiert. Der für die Simulationsrechnungen benötigte Querwiderstandsbeiwert wird mithilfe von Modellversuchen im Windkanal bestimmt. Weiterhin werden in diesem Kapitel ausgewählte Ergebnisse von Bewegungssimulationen und Messungen am naturgroßen Schiff in einem natürlichen Gewässerabschnitt miteinander verglichen.

Im Kapitel 6 werden die erreichten Ergebnisse noch einmal zusammengefasst und abschließend bewertet.

2 Mathematisches Modell

Zunächst werden die bereits bekannten Bewegungsgleichungen eines Schiffes in ruhendem Wasser dargestellt. Die Gleichungen für Schiffsbewegungen in fließenden Gewässern werden im Abschnitt 2.2 hergeleitet.

2.1 Bewegungsgleichungen im ruhenden Wasser

Grundlage für das mathematische Modell sind die Bewegungsgleichungen eines Körpers in einer Flüssigkeit. Sie folgen aus der Anwendung der Impulsgesetze der Mechanik. Die Trägheitswirkung der Flüssigkeit wird durch hydrodynamische Massen und hydrodynamische Trägheitsmomente dargestellt. Für ein schiffsfestes Koordinatensystem $Oxyz$ (Bild 2.1) folgt bei einer Beschränkung der Bewegung auf die Translation in der xy -Ebene und die Drehung um die z -Achse [Schmitz, 1961]

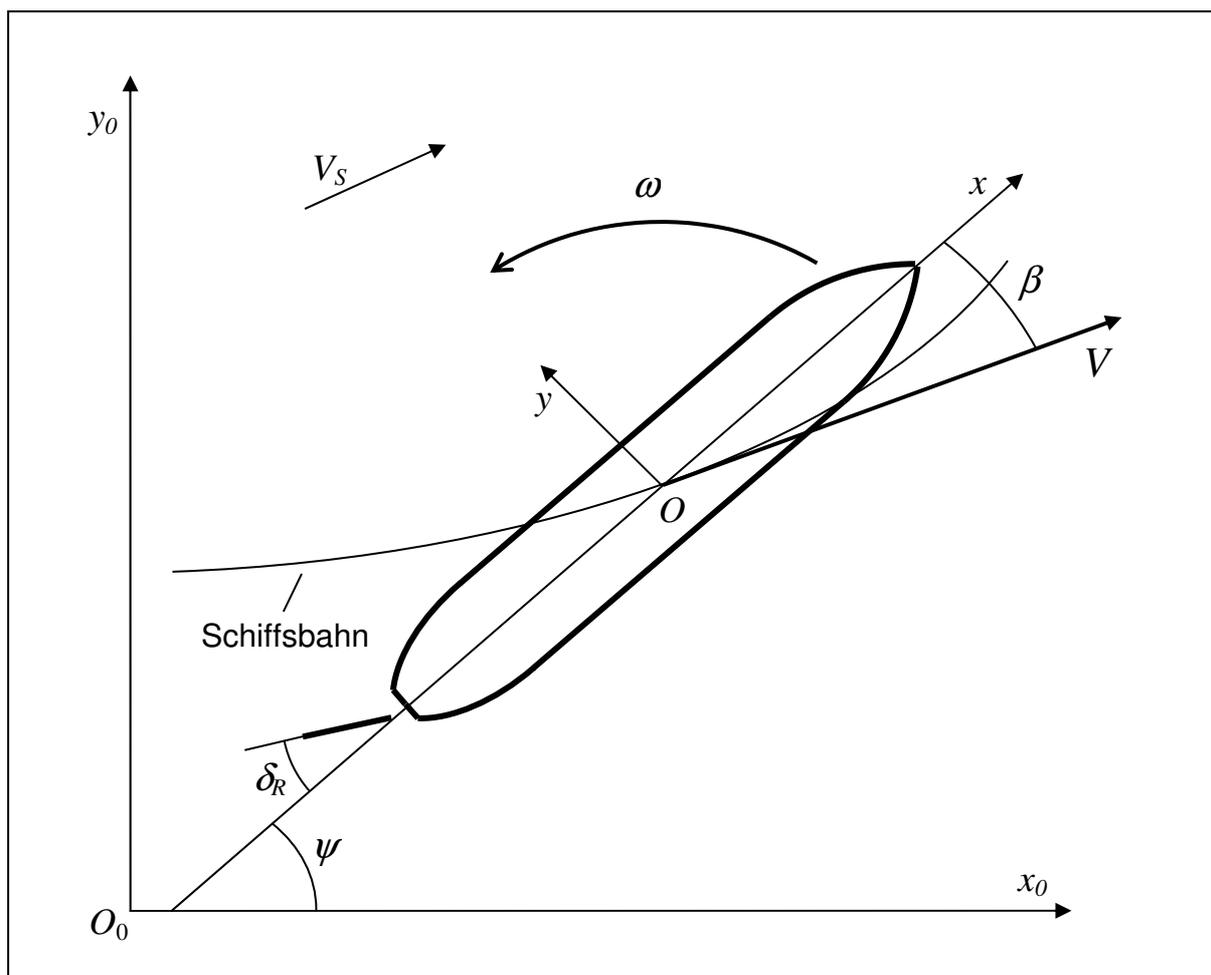


Bild 2.1 Koordinatensysteme und Bezeichnungen für die Bewegung in einer horizontalen Ebene

$$\begin{aligned}
(m + m_x) \frac{dv_x}{dt} - (m + m_y) v_y \omega &= X , \\
(m + m_y) \frac{dv_y}{dt} + (m + m_x) v_x \omega &= Y , \\
(I_z + I_{hz}) \frac{d\omega}{dt} + (m_y - m_x) v_x v_y &= N .
\end{aligned}
\tag{2.1}$$

Der Koordinatenursprung O befindet sich im gemeinsamen Schwerpunkt von Masse des Schiffes und hydrodynamischer Masse. Dabei ist m die Schiffsmasse, m_x und m_y sind die hydrodynamischen Massen bei Bewegung in x - bzw. y -Richtung, I_z und I_{hz} stellen das Massen- bzw. hydrodynamische Massenträgheitsmoment bezüglich der z -Achse dar. Weiterhin ist ω die Drehgeschwindigkeit um die Schiffshochachse, v_x und v_y sind die Komponenten der Translationsgeschwindigkeit V in die durch den Index angegebene Koordinatenrichtung. Mit V wird in dieser Arbeit die Schiffsgeschwindigkeit bezüglich des raumfesten Koordinatensystems $O_0x_0y_0z_0$ bezeichnet, d.h. die Geschwindigkeit über Grund. Auf der rechten Seite der Gleichung stehen die Komponenten der äußeren Kräfte X und Y sowie das Moment N infolge Zähigkeit, Wirbel- und Wellenbildung.

Bewegt sich das Schiff mit dem Gierwinkel β , das ist der Winkel zwischen der Richtung der Schiffsgeschwindigkeit V und der x -Achse, so gilt für die Geschwindigkeitskomponenten und ihre zeitlichen Ableitungen

$$\begin{aligned}
v_x &= V \cos \beta , \\
\frac{dv_x}{dt} = \dot{v}_x &= \dot{V} \cos \beta - V \sin \beta \dot{\beta} , \\
v_y &= -V \sin \beta , \\
\frac{dv_y}{dt} = \dot{v}_y &= -\dot{V} \sin \beta - V \cos \beta \dot{\beta} .
\end{aligned}
\tag{2.2}$$

Mit diesen Bezeichnungen lauten die Bewegungsgleichungen im schiffsfesten Koordinatensystem:

$$\begin{aligned}
(m + m_x)(\dot{V} \cos \beta - V \sin \beta \dot{\beta}) - (m + m_y)(-V \sin \beta) \omega &= X , \\
(m + m_y)(-\dot{V} \sin \beta - V \cos \beta \dot{\beta}) + (m + m_x)(V \cos \beta) \omega &= Y , \\
(I_z + I_{hz}) \dot{\omega} - (m_y - m_x) \frac{V^2}{2} \sin 2\beta &= N .
\end{aligned} \tag{2.3}$$

Der zweite Term auf der linken Seite der Momentengleichung in Gleichung (2.3) stellt ein Trägheitsmoment dar, das sich infolge der Differenz der hydrodynamischen Massen bei Bewegung mit Gierwinkel ergibt. Es will einen kleinen Gierwinkel vergrößern und wird deshalb als „instabiles Moment“ bezeichnet [Schmitz, 1961]. Dieses instabile Moment tritt in realer Flüssigkeit nur mit ungefähr der halben Größe des für eine reibungsfreie Flüssigkeit geltenden Wertes auf [Puls, 1987]. Dies wird von Schmitz mit der ausbleibenden Impulsrücklenkung im Heckbereich des Schiffes erklärt. Aus diesem Grund wird das instabile Moment in der Regel mit dem äußeren Moment zusammengefasst.

2.2 Bewegung eines Schiffes im Strom

In diesem Kapitel werden die Bewegungsgleichungen um die zeitliche Änderung des Impulses der Strömung erweitert. Die Reaktionen der Flüssigkeit auf den Körper infolge der Änderung des hydrodynamischen Impulses \vec{P}_s und des hydrodynamischen Drehimpulses \vec{D}_s durch die Bewegung des Körpers im Strom werden als äußere Kräfte auf die rechte Seite der Bewegungsgleichungen geschrieben. Die zusätzlichen äußeren Kräfte und Momente infolge Zähigkeit und Wirbelbildung bei einer Bewegung im Strom werden im nachfolgenden Kapitel 3 beschrieben. Sie werden zunächst mit den anderen äußeren Lasten zusammengefasst.

Bei der Herleitung der Bewegungsgleichungen im Strom wird von einem bekannten zweidimensionalen Strömungsfeld in der $x_0 y_0$ -Ebene ausgegangen. Die Strömungsgeschwindigkeit wird als konstant über die gesamte Wassertiefe

vorausgesetzt. Die Änderung der Strömungsverhältnisse durch die Schiffsbewegung wird nicht berücksichtigt.

In dieser Arbeit wird von einer zeitkonstanten, im raumfesten Koordinatensystem ortsabhängigen Strömung ausgegangen. Die Geschwindigkeit des Stromes im schiffsfesten Koordinatensystem (V_{Sx} und V_{Sy}) am Ort des Schiffes bei $y=0$ ist von der Lage des Schiffes im raumfesten Koordinatensystem abhängig. Bewegt sich das Schiff in dieser Strömung so sind V_{Sx} und V_{Sy} von der Zeit abhängig.

Wenn $X \frac{dP_s}{dt}$, $Y \frac{dP_s}{dt}$ und $N \frac{dD_s}{dt}$ die Komponenten der Kräfte und Momente infolge der zeitlichen Änderung des hydrodynamischen Impulses der Strömung sind, kann für sie der folgende Ansatz bezogen auf das schiffsfeste Koordinatensystem geschrieben werden.

$$\begin{aligned} X \frac{dP_s}{dt} &= \frac{dP_{Sx}}{dt} + \omega \cdot P_{Sy} \\ Y \frac{dP_s}{dt} &= \frac{dP_{Sy}}{dt} + \omega \cdot P_{Sx} \\ N \frac{dD_s}{dt} &= \frac{dD_{Sz}}{dt} + v_x \cdot P_{Sy} - v_y \cdot P_{Sx} \end{aligned} \tag{2.4}$$

Mit den Indizes x , y und z sind die Komponenten von \vec{P}_s und \vec{D}_s in die jeweilige Richtung gekennzeichnet.

Der hydrodynamische Impuls infolge der Anströmung des Körpers im Strom entspricht dem hydrodynamischen Impuls des bewegten Körpers in ruhender Flüssigkeit bei Bewegung mit der Geschwindigkeit des Stromes entgegen der Richtung der Anströmung.

Für die Komponente P_{Sx} infolge des Stromes kann in erster Näherung mit der Strömungsgeschwindigkeit in Schiffslängsrichtung $V_{Sx}(t)$ im Koordinatenursprung

des schiffsfesten Systems und der hydrodynamischen Masse m_x des Körpers bei Bewegung in ruhender Flüssigkeit geschrieben werden:

$$P_{Sx} = -m_x \cdot V_{Sx}(t). \quad (2.5)$$

Bei der Komponente P_{Sy} des Impulses infolge des Stromes quer zum Schiff ist die Veränderlichkeit des Stromes über die Schiffslänge zu beachten. Der Impuls pro Längeneinheit quer zum Schiff dP_{Sy} / dx wird mit der hydrodynamischen Masse pro Längeneinheit $\bar{m}_y(x)$ für den als eben umströmt betrachteten Spantquerschnitt bei Bewegung in ruhender Flüssigkeit und der Geschwindigkeit $V_{Sy}(t, x)$ des Stromes quer zum Schiff an der Stelle x bei $y = 0$ angegeben.

$$\frac{dP_{Sy}}{dx} = -\bar{m}_y(x) \cdot V_{Sy}(t, x) \quad (2.6)$$

Damit kann der hydrodynamische Impuls infolge des Stromes in y -Richtung geschrieben werden als:

$$P_{Sy} = -\int_L \bar{m}_y(x) \cdot V_{Sy}(t, x) dx. \quad (2.7)$$

Der hydrodynamische Drehimpuls infolge des Stromes ergibt sich senkrecht zur x, y -Ebene in z -Richtung zu:

$$D_{Sz} = -\int_L \bar{m}_y(x) \cdot V_{Sy}(t, x) \cdot x \cdot dx. \quad (2.8)$$

Wird, wie allgemein üblich, das instabile Moment beim äußeren, am Schiff angreifenden Moment N um die z -Achse mit erfasst, ergeben sich die Bewegungsgleichungen in folgender Form. Dabei enthält das instabile Moment auch den Beitrag des Stromes.

$$\begin{aligned}
(m + m_x)\dot{V} \cos \beta - (m + m_x)V \sin \beta \dot{\beta} + (m + m_y)V \sin \beta \omega = \\
X + m_x \frac{dV_{Sx}(t)}{dt} + \int_L \bar{m}_y(x) \cdot V_{Sy}(x,t) dx \cdot \omega \\
- (m + m_y)\sin \beta \dot{V} - (m + m_y)V \cos \beta \dot{\beta} + (m + m_x)V \cos \beta \omega = \\
Y + \int_L \bar{m}_y(x) \cdot \frac{dV_{Sy}(x,t)}{dt} dx + m_x V_{Sx}(t) \cdot \omega \quad (2.9) \\
(I_z + I_{hz})\dot{\omega} = N + \int_L \bar{m}_y(x) \cdot \frac{dV_{Sy}(x,t)}{dt} \cdot x \cdot dx
\end{aligned}$$

Für die weiteren Untersuchungen sollen die Bewegungsgleichungen in der bekannten Weise dimensionslos gemacht werden. Die Terme sind durch den Staudruck der Schiffsgeschwindigkeit $\rho V^2 / 2$ und die Lateralfäche A_L zu dividieren. Die Momentengleichung ist zusätzlich durch die Schiffslänge L zu dividieren.

Weiterhin werden die dimensionslose Zeit τ und die dimensionslose momentane Bahnkrümmung Ω eingeführt:

$$d\tau = \frac{V}{L} dt \quad ; \quad \Omega = \frac{L}{V} \omega. \quad (2.10)$$

Ableitungen nach der dimensionslosen Zeit τ werden mit „'“ gekennzeichnet.

Mit den obigen Ansätzen ergeben sich die dimensionslosen Bewegungsgleichungen für die Bewegung eines Schiffes im Strom zu:

$$\begin{aligned}
\kappa_x \cos \beta \frac{V'}{V} - \kappa_x \beta' \sin \beta + \kappa_y \sin \beta \Omega &= c_x + \frac{V'_{Sx}}{V} \hat{\kappa}_x + \frac{\int \bar{m}_y \frac{V'_{Sy}}{V} dx}{\frac{\rho}{2} A_L L} \Omega, \\
-\kappa_y \sin \beta \frac{V'}{V} - \kappa_y \cos \beta \beta' + \kappa_x \cos \beta \Omega &= c_y + \frac{\int \bar{m}_y \frac{V'_{Sy}}{V} dx}{\frac{\rho}{2} A_L L} + \hat{\kappa}_x \frac{V'_{Sx}}{V} \Omega, \\
\mu \frac{V'}{V} \Omega + \mu \Omega' &= c_n + \frac{\int \bar{m}_y \frac{V'_{Sy}}{V} x dx}{\frac{\rho}{2} A_L L^2}.
\end{aligned} \tag{2.11}$$

Die Bedeutung der einzelnen Koeffizienten wird in Kapitel 3 erläutert.

3 Koeffizienten im mathematischen Modell

Die Koeffizienten in den Gleichungen (2.11) stellen einerseits Massen und Massenträgheitsmomente und andererseits die infolge Wasserzähigkeit und Wirbelbildung entstehenden äußeren Kräfte und Momente in dimensionsloser Form dar. In dieser Arbeit werden die Koeffizienten deswegen in zwei Gruppen unterteilt:

1. Massenkoeffizienten: In diese Gruppe gehören die dimensionslosen Massenbeiwerte κ_x , κ_y , $\hat{\kappa}_x$, $\hat{\kappa}_y$ und die dimensionslosen Massenträgheitsbeiwerte μ , $\hat{\mu}$.
2. Kraftkoeffizienten: Dazu gehören der dimensionslose Längskraftbeiwert c_x , der dimensionslose Querkraftbeiwert c_y und der dimensionslose Momentenbeiwert c_n um die z-Achse.

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden die Koeffizienten sowie ihre Berechnung nach verschiedenen Methoden und Ansätzen näher beschrieben.

3.1 Massenkoeffizienten

3.1.1 Definition

Die Massenkoeffizienten werden wie folgt definiert:

$$\begin{aligned} \kappa_x &= \frac{m + m_x}{\frac{\rho}{2} A_L L} ; & \kappa_y &= \frac{m + m_y}{\frac{\rho}{2} A_L L} ; & \mu &= \frac{I_z + I_{hz}}{\frac{\rho}{2} A_L L^3} ; \\ \hat{\kappa}_x &= \frac{m_x}{\frac{\rho}{2} A_L L} ; & \hat{\kappa}_y &= \frac{m_y}{\frac{\rho}{2} A_L L} ; & \hat{\mu} &= \frac{I_{hz}}{\frac{\rho}{2} A_L L^3} . \end{aligned} \quad (3.1)$$

Die kinetische Energie der Flüssigkeit entspricht der Arbeit, die zur Beschleunigung des Körpers in einer Flüssigkeit von „0“ auf die Geschwindigkeit V zusätzlich aufzubringen ist als im Vakuum. Die kinetische Energie eines Flüssigkeitsteilchens ist proportional dem Quadrat seiner Geschwindigkeit; diese aber ist proportional der Körpergeschwindigkeit V , so dass die gesamte Energie der Flüssigkeit proportional

dem Quadrat der Körpergeschwindigkeit gesetzt werden kann. Die Proportionalitätsgrößen m_x , m_y und I_{hz} haben die Dimension einer Masse ([kg]) bzw. eines Trägheitsmomentes ([kg·m²]), deswegen werden sie in der Praxis als hydrodynamischen Massen bzw. hydrodynamische Trägheitsmomenten bezeichnet. Sie sind feste Werte in Abhängigkeit von Größe, Form und Lage des Körpers zur Bewegungsrichtung sowie von der Wassertiefe. Manche Autoren betrachten die hydrodynamischen Massen als „Reaktion des Schiffes auf Beschleunigung“ [Gronarz, 1997] und addieren sie zu den äußeren Einflüssen auf der rechten Seite der Bewegungsgleichungen (2.1). In dieser Arbeit werden die hydrodynamischen Massen und Trägheitsmomente auf der linken Seite der Gleichungen eingesetzt. Multipliziert mit der Beschleunigung bzw. Winkelbeschleunigung modellieren sie die zusätzlichen Trägheitskräfte bzw. Momente infolge Bewegung eines Körpers in einer Flüssigkeit.

3.1.2 Ermittlung der hydrodynamischen Massen und Trägheitsmomente

Die Masse und das Trägheitsmoment des Schiffes werden als bekannt vorausgesetzt. Deswegen wird in diesem Kapitel nur die theoretische Ermittlung der hydrodynamischen Massen in Längs- und Querrichtung sowie des hydrodynamischen Trägheitsmomentes um die Hochachse behandelt.

Die Ermittlung der hydrodynamischen Massen ist grundsätzlich mittels experimenteller und theoretischer Methoden möglich.

Mehrere experimentelle Methoden sind von [Korotkin,1986] ausführlich dargestellt worden. Alle setzen Versuche mit zwangsgeführten Modellen voraus. Bei dieser Art der Bestimmung der hydrodynamischen Massen eines Schiffes haben sich die Planar-Motion-Mechanismen [Wolf 1981, Gronarz 1997] durchgesetzt. Dabei wird ein Schiffsmodell in einer zur ungestörten Wasseroberfläche parallelen Ebene zwangsgeführt. Aus der Analyse der in Abhängigkeit von der Zeit ermittelten Kräfte und Momente lassen sich Kraft- und Momentenanstiege infolge Bewegung mit Gierwinkel und Drehung um die Hochachse sowie die hydrodynamischen Massen und hydrodynamischen Trägheitsmomente ermitteln. Der Aufwand hierfür ist erheblich.

Für weniger aufwendige Näherungslösungen eignen sich verschiedene theoretische Ansätze. Aufgrund der einfachen Handhabbarkeit wird in dieser Arbeit auf das Paneelverfahren zurückgegriffen.

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird die formelle Berechnung der hydrodynamischen Masse in y-Richtung m_y beschrieben. Dabei wird auch der Einfluss der endlichen Wassertiefe berücksichtigt [Kleinau 1986].

Bei der Berechnung der Umströmung des Schiffes bei beschränkter Wassertiefe wird angenommen, dass das Schiff schlank ist. Das bedeutet, dass das Tiefgang-Längen-Verhältnis klein ist und über die Längsachse nur mäßige Querschnittsänderungen auftreten dürfen [Puls, 1987]. Die Schiffsgeschwindigkeit V liegt in der Regel unter der kritischen Geschwindigkeit, d.h. für die Froudesche Tiefenzahl gilt:

$$Fn_H = \frac{V}{\sqrt{gH}} < 1 \quad (3.1)$$

mit

- g - Erdbeschleunigung,
- H - Wassertiefe.

Damit ist die für die Wellenbildung maßgebende Froudezahl $Fn = V / \sqrt{gL}$ von einer Größenordnung, bei der wie bei tiefem Wasser das Spiegelungsprinzip angewendet werden kann [Kleinau, 1986]. Zur Berechnung der Schiffsumströmung kann damit von der Bewegung eines Doppelkörpers, der durch Spiegelung des Unterwasserschiffes an der ungestörten Wasseroberfläche entsteht, in einer durch zwei parallele Wände begrenzten Flüssigkeit ausgegangen werden. Der Abstand zwischen den Wänden entspricht der doppelten Wassertiefe (Bild 3.1).

Unter der Annahme eines schlanken Schiffes kann die hydrodynamische Masse für den ganzen Doppelkörper bei Bewegung in Querrichtung durch Summation der hydrodynamischen Massen der einzelnen Querschnitte infolge ebener Umströmung entlang der x-Achse bestimmt werden.

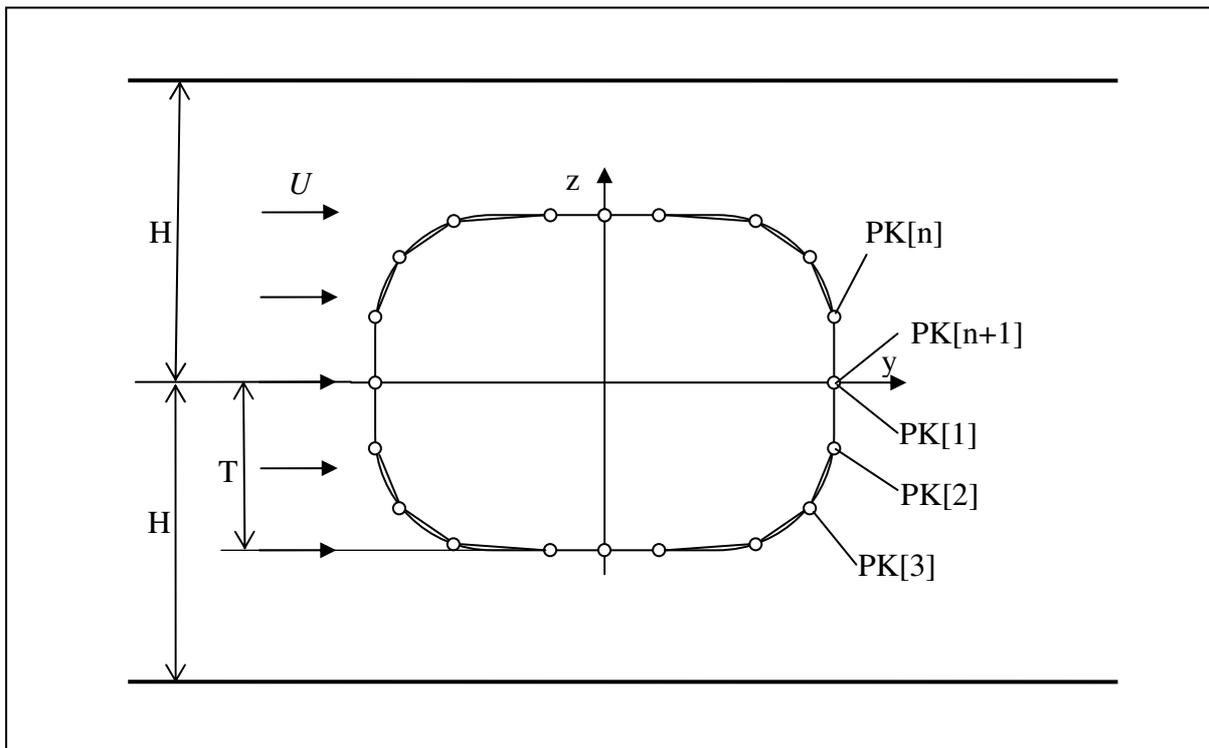


Bild 3.1 Koordinatensystem für die Berechnung der hydrodynamischen Masse

Der jeweilige Querschnitt wird durch eine bestimmte Anzahl von nicht gekrümmten Paneelen dargestellt. Die physikalische Grundlage für den mathematischen Algorithmus ist das von Hess und Smith eingeführte allgemeine Singularitätenverfahren. Dabei wird in der Mitte jedes Paneels eine Singularität (Quelle/Senke oder Wirbel) angeordnet, deren Potenzial berechnet werden muss, um anschließend die hydrodynamische Masse des betrachteten Querschnittes zu berechnen. Bei der Berechnung muss die kinematische Randbedingung erfüllt werden. Diese besagt, dass die von allen Paneelen induzierte Normalgeschwindigkeit an der Körperoberfläche gleich der Normalkomponente der Geschwindigkeit der Körperoberfläche sein muss. Bei beschränkter Wassertiefe müssen die seitlichen Begrenzungen des Strömungsgebietes Stromlinien sein. Dies wird erreicht, indem die Singularitäten auf dem Rand des Querschnittes wiederholt an den beiden Begrenzungen gespiegelt werden. Da es sich hier um ein potenzialtheoretisches Verfahren handelt, wird von einem idealen Fluid ausgegangen, das inkompressibel und drehungsfrei ist.

Bei bekanntem Geschwindigkeitspotenzial kann die hydrodynamische Masse eines beliebigen Querschnittes wie folgt ermittelt werden [Gyon, Petit,1997]:

$$m_h = \frac{\rho}{U^2} \oint \varphi \frac{\partial \varphi}{\partial n} dS \quad (3.2)$$

mit

U - Anströmgeschwindigkeit in der Nähe des Querschnittes,

φ - ortsabhängige Potenzialfunktion,

ρ - Flüssigkeitsdichte.

Nach [Kleinau 1986] lässt sich das Potenzial φ_k jedes Paneels wie folgt berechnen.

$$\varphi_k = \sum_{j=1}^n \operatorname{Re}\{\Delta F_{kj}\} \quad (3.3)$$

ΔF_{jk} ist das Potenzial, das von Paneel k auf Paneel j induziert wird. Bei Verwendung von Quellen kann dieses Potenzial wie folgt berechnet werden.

$$\Delta F_{jk} = \frac{Q_k \Delta s_k}{2} \left(\frac{1}{\xi} \ln \left(\frac{1+\xi}{1-\xi} \right) + \ln \left(\frac{1-\xi^2}{\xi^2} \right) \right) \quad \text{für } j \neq k \quad (3.4)$$

$$\Delta F_{jk} = i \frac{Q_k \Delta s_k}{2} \pi \quad \text{für } j = k$$

mit

$$\xi = \frac{i \cdot n_k \Delta s_k}{2(\zeta_j - \zeta_k)}, \quad n_k = e^{i\theta_k}. \quad (3.5)$$

In den obigen Formeln bedeuten:

Q_k – Quellenstärke,

ζ_j – Komplexe Koordinaten des Paneelmittelpunktes ($\zeta_j = y_j + iz_j$),

Δs_k – Länge des Paneels,

- n_k – Normalvektor,
- θ_k – Winkel zwischen Normalvektor und positiver y -Achse,
- i – Imaginäre Einheit .

Die unbekannte Quellenstärkenverteilung auf dem Querschnittsrand kann mithilfe der kinematischen Randbedingung bestimmt werden. Demnach muss die von allen Paneelen induzierte Normalgeschwindigkeit an der Körperoberfläche gleich der Normalkomponente der Geschwindigkeit der Körperoberfläche sein.

$$\Delta v_n(\zeta_j) = \sum_{k=1}^n A_{jk}^{(N)} Q_k \quad (3.6)$$

mit

$$\Delta v_n(\zeta_j) = U \cdot \cos \theta_j, \quad (3.7)$$

$$A_{jk}^{(N)} = \operatorname{Re} \left\{ -ie^{i(\theta_j - \theta_k)} \ln \left(\frac{\sin \zeta(1 + \xi)}{\sin \zeta(1 - \xi)} \right) \right\} \quad \text{für } j \neq k \quad (3.8)$$

$$A_{jk}^{(N)} = \pi \quad \text{für } j = k$$

mit

$$\zeta = \frac{\pi}{2Hi} (\zeta_j - \zeta_k) \quad (3.9)$$

Das Gleichungssystem (3.6) kann mithilfe des Gauß'schen Eliminationsverfahrens gelöst werden. Die durch die Anwendung des Verfahrens berechneten Quellenstärken werden in Gleichungen (3.4) und (3.3) eingesetzt, um das Störpotenzial jedes Paneels zu berechnen. Bei bekannten Störpotenzialen kann die hydrodynamische Masse in y -Richtung wie folgt berechnet werden:

$$m_y = -\frac{\rho}{U^2} \sum_{k=1}^n \varphi_k \cos \theta_{ki} \Delta s_k. \quad (3.10)$$

Die berechnete hydrodynamische Masse hat die Dimension einer Masse pro Längeneinheit und bezieht sich auf den gespiegelten Querschnitt. Um die hydrodynamische Masse des realen Schiffsquerschnitts zu erhalten, wird die hydrodynamische Masse des Doppelspantes durch zwei dividiert.

Ist die hydrodynamische Massenverteilung über die x-Achse $\bar{m}_y(x)$ bekannt, gilt für m_y und I_{hz} :

$$m_y = \int_L \bar{m}_y(x) dx, \quad I_{hz} = \int_L \bar{m}_y(x) \cdot x^2 dx. \quad (3.11)$$

Die hydrodynamische Masse m_x wird auf Grund empirischer Erfahrungen als 5% von der hydrodynamischen Masse in y-Richtung m_y bestimmt [Puls, 1987].

3.2 Kraftkoeffizienten

3.2.1 Definition

Die Kraftkoeffizienten stellen die äußeren Kräfte X, Y und das äußere Moment N auf der rechten Seite der Bewegungsgleichungen (2.11) in dimensionsloser Form dar. Diese Kräfte und Momente modellieren die äußeren Einflüsse, die auf das Schiff wirken. Es handelt sich um Lasten, die infolge Zähigkeit, Wirbelbildung, Wellenbildung, Gewässerströmung usw. auf den Schiffsrumpf wirken, sowie um die Ruder- und Propellerkräfte.

$$c_x = \frac{X}{\frac{\rho}{2} A_L V^2}; \quad c_y = \frac{Y}{\frac{\rho}{2} A_L V^2}; \quad c_n = \frac{N}{\frac{\rho}{2} A_L V^2 L} \quad (3.12)$$

Die äußeren Kräfte und Momente sind von den Bewegungs- und Steuergrößen (Geschwindigkeit V bzw. Winkelgeschwindigkeit ω , Gierwinkel β , Propellerdrehzahl n_p und Ruderwinkel δ_R) und wegen des Einflusses der Zähigkeit und der Oberflächenwellen auch von der Reynoldszahl R_n und der Froudezahl F_n funktionell abhängig. Da die infolge gesteuerter Bewegungen auftretenden

Geschwindigkeitsänderungen in der Regel klein sind, kann die Abhängigkeit der hydrodynamischen Belastungen von Reynolds- und Froudezahl vernachlässigt werden [Puls, 1987].

$$\left. \begin{matrix} X \\ Y \\ N \end{matrix} \right\} = f(v_x, v_y, \omega, n_p, \delta_R) \quad (3.13)$$

In Gleichung (3.13) sind die äußeren Einflüsse wie beispielsweise Gewässerströmung nicht berücksichtigt. Die Formel soll lediglich zur Erläuterung der Vorgehensweise dienen.

In dimensionsloser Form und unter Berücksichtigung der Beziehungen in Gleichung (2.2) und Gleichung (2.10) kann für v_x und v_y der Gierwinkel β sowie für ω die momentane Bahnkrümmung Ω eingesetzt werden.

$$\left. \begin{matrix} c_x \\ c_y \\ c_n \end{matrix} \right\} = f(\beta, \Omega, \frac{n_p}{n_0}, \delta_R) \quad (3.14)$$

Dabei ist n_0 eine konstante Bezugsdrehzahl.

Die unbekannte funktionelle Abhängigkeit der äußeren Lasten von den Einflussgrößen wird in der Regel durch Polynome dargestellt, deren Terme eine lineare bzw. nichtlineare Abhängigkeit der Kräfte von einer oder mehreren Einflussgrößen erfassen.

$$c = c_0 + c_1\beta + c_2\beta|\beta| + \dots + c_j\Omega + c_{j+1}\Omega|\Omega| + \dots + c_k\beta\Omega + \dots + c_i \frac{n}{n_0} \delta_R + \dots \quad (3.15)$$

Der einfachste Ansatz ist eine lineare Abhängigkeit der Kräfte von v_y und ω bzw. β und Ω . Dieser Ansatz liefert bei kleinen Gierwinkeln und Bahnkrümmungen brauchbare Ergebnisse; er wird oft benutzt, um Aussagen über die dynamische Gierstabilität des schwimmenden Körpers zu treffen [Puls, 1987].

Eine weite Verbreitung hat der Ansatz von Abkowitz [Abkowitz, 1964] [Gronarz, 1997] gefunden. Danach wird die funktionelle Abhängigkeit einer Kraft von den Einflussparametern durch eine Taylorreihenentwicklung dargestellt. Meist wird die Taylorreihe nach dem 3. Grad abgebrochen, da Terme höheren Grades nur unwesentlich zur Erhöhung der Genauigkeit typischer Manövriersimulationen beitragen. Wird die Taylorreihenentwicklung bereits nach dem 1. Grad abgebrochen, so erhält man den bereits vorgestellten linearen Ansatz. Die Identifikation der Koeffizienten in den Polynomen erfolgt durch Kraftmessungen an Schiffsmodellen. Dabei wird nur die Gesamtkraft erfasst, so dass es nicht mehr möglich ist, einzelne Terme den tatsächlichen physikalischen Zusammenhängen zuzuordnen [Gronarz, 1997].

In den letzten Jahren gewinnen so genannte modularisierte Ansätze zunehmend an Bedeutung [Oltmann, Sharma, 1984]. Dabei werden alle an der Bewegung beteiligten Kräfte als klar von einander abgegrenzte Komponenten behandelt. Eine im Schiffbau übliche Zerlegung der Kräfte ist die Unterteilung in „Schiff“, „Propeller“ und „Ruder“.

Die allgemeine Darstellung lautet dann:

$$\begin{aligned}
 \underbrace{X}_{\text{Gesamt}} &= \underbrace{X_H}_{\text{Schiffsrumpf}} + \underbrace{X_P}_{\text{Propeller}} + \underbrace{X_R}_{\text{Ruder}} \\
 \underbrace{Y}_{\text{Gesamt}} &= \underbrace{Y_H}_{\text{Schiffsrumpf}} + \underbrace{Y_P}_{\text{Propeller}} + \underbrace{Y_R}_{\text{Ruder}} \\
 \underbrace{N}_{\text{Gesamt}} &= \underbrace{N_H}_{\text{Schiffsrumpf}} + \underbrace{N_P}_{\text{Propeller}} + \underbrace{N_R}_{\text{Ruder}}
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

In den folgenden Abschnitten der Arbeit werden die einzelnen Komponenten der Kräfte und des Momentes in Gleichung (3.16) näher erläutert.

3.2.1.1 Rumpfkkräfte

Mit dem Begriff Rumpfkkräfte werden alle Kräfte bezeichnet, die am Schiffsrumpf infolge dessen Umströmung auftreten. Durch die Umströmung bildet sich um den

Schiffskörper ein inhomogenes Druckfeld aus, wobei die Druckunterschiede die Kräfte auf den Schiffsrumpf hervorrufen.

Nach [Oltmann, Sharma, 1984] werden die auf den Rumpf wirkenden Kräfte und Momente methodisch in Auftriebskräfte und Widerstandskräfte unterteilt (Bild 3.2). Per Definition wirken die Auftriebskräfte senkrecht und die Widerstandskräfte parallel zur Anströmung. Die Komponente der Widerstandskraft in Schiffslängsrichtung stellt den Schiffswiderstand infolge Wellenbildung, Reibung und Grenzschichtablösung dar. In Schiffsquerrichtung ist unter Widerstandskraft diejenige Kraft zu verstehen, die sich aus der ebenen Umströmung der einzelnen Querschnitte mit der lokalen Querströmung ergibt. Die lokale Querströmung resultiert dabei aus dem Drehen und dem Driften des Schiffes sowie aus der Gewässerströmung. Die Querkomponenten der Auftriebs- und der Widerstandskräfte bewirken Momente bezüglich des Koordinatenursprungs des schiffsfesten Koordinatensystems. Die gesamte Längs- bzw. Querkraft am Schiffsrumpf ergibt sich aus den Komponenten der Auftriebs- und Widerstandskraft in die jeweilige Richtung. Das gesamte Moment ergibt sich aus der Summe der durch die Querkomponenten der Auftriebs- und Widerstandskraft hervorgerufenen Momente. Der allgemeine Ansatz für die Rumpfkkräfte bzw. -momente lautet dann:

$$\begin{aligned} X_H &= X_{HL} - R_T \\ Y_H &= Y_{HL} + Y_{HC} \\ N_H &= N_{HL} + N_{HC} \end{aligned} \tag{3.17}$$

Mit R_T ist der Schiffswiderstand in Schiffslängsrichtung gekennzeichnet. Er ist stets gegen die Bewegungsrichtung gerichtet. Deswegen ist er in Gleichung (3.17) mit negativem Vorzeichen geschrieben. Die Indizes HL stehen für Hull Lifting bzw. HC für Hull Cross-flow. Die Längskomponente der Auftriebskraft X_{HL} ist in die Richtung der positiven x-Achse des Schiffes gerichtet. Diese Längskomponente wird in dieser Arbeit mit dem Schiffswiderstand zusammengefasst.

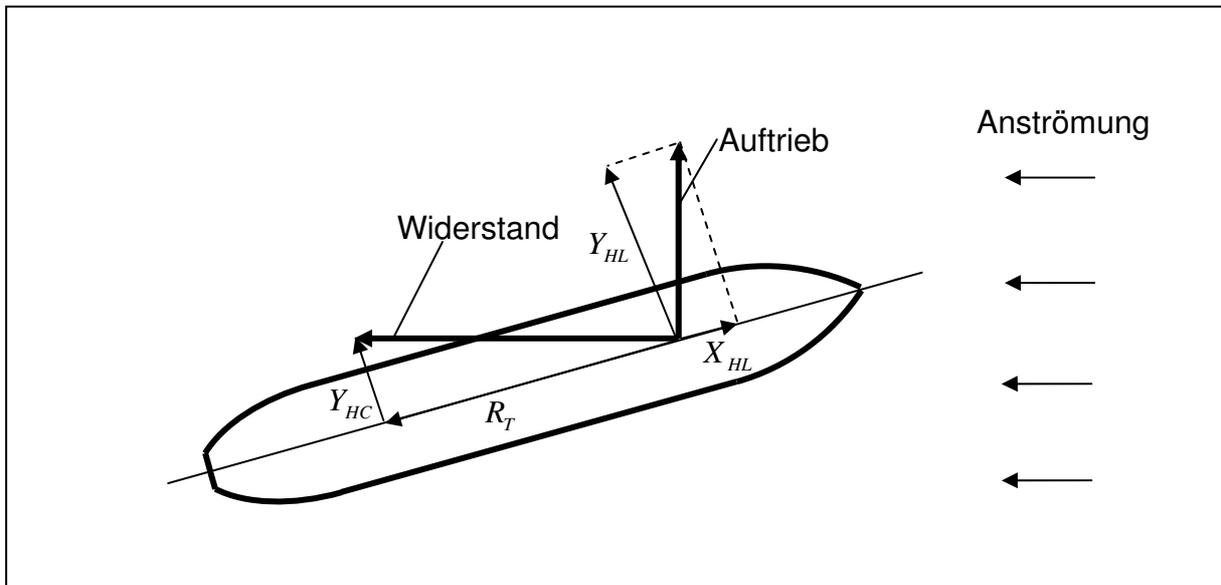


Bild 3.2 Unterteilung der Rumpfkräfte

Die Anströmung des Schiffskörpers ergibt sich einerseits aus der Translation des Körpers mit Gierwinkel und der Drehung um die Hochachse und andererseits aus der Gewässerströmung, d.h., die Kräfte in Gleichung (3.17) beinhalten auch Komponenten, die sich aus der Gewässerströmung ergeben.

Bei der Untersuchung der Steuereigenschaften von Schiffen wird in der Regel von einer geringen Änderung der Schiffsgeschwindigkeit V infolge Manöver ausgegangen. Daher kann bei der Durchführung von Bewegungssimulationen die Gleichung in Schiffslängsrichtung unberücksichtigt bleiben. Im Fall von Untersuchungen im Fließgewässer ist das jedoch nicht zulässig, da die Schiffsgeschwindigkeit V über dem Boden stark von der Fließgeschwindigkeit des Gewässers beeinflusst wird. Es wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass die Strömung in Schiffslängsrichtung als konstant über die Schiffslänge betrachtet werden darf. Unter dieser Annahme kann der Einfluss der Strömung auf die Schiffsgeschwindigkeit mithilfe von schon veröffentlichten Methoden [Schneekluth, 1988] sowie [Chislett, Wied, 1985] berücksichtigt werden.

Für die Aufstellung der Gleichung in Schiffslängsrichtung wird der Schiffswiderstand benötigt. Dieser wird in der vorliegenden Arbeit als bekannt vorausgesetzt. Die Querkraft Y_H und das Giermoment N_H , die für das Manövrierverhalten maßgebend sind, werden im Kapitel 3.2.2 weiter erläutert.

3.2.1.2 Ruderkräfte

Die Ruderkräfte entstehen durch die Umströmung des Ruders mit unterschiedlichen Anströmwinkeln. Wird das Ruder als Flügel betrachtet, so ist die durch die Umströmung induzierte Kraft neben dem Flügelprofil nur von der Anströmgeschwindigkeit V_A und dem Anströmwinkel α abhängig.

$$F_R = c_A \frac{\rho}{2} A_0 V_A^2 \sin \alpha \quad (3.18)$$

Dabei ist c_A ein von der Ruderform abhängiger Koeffizient und A_0 die Ruderfläche.

Die Anströmgeschwindigkeit resultiert einerseits aus der Bewegung des Schiffes. Andererseits befindet sich das Ruder in dem von dem Propeller erzeugten Geschwindigkeitsfeld, was zur Erhöhung der Anströmgeschwindigkeit führt. Diese Erhöhung der Anströmgeschwindigkeit bedingt die Abhängigkeit der Ruderkraft von der Propellerdrehzahl n_p . Von maßgebender Bedeutung für die Steuerbarkeit des Schiffes ist der Anströmwinkel, da durch die Anströmung des Ruders mit diesem Winkel die für die Steuerung notwendigen Kräfte entstehen. Bewegt sich das Schiff geradeaus bei ausgeschaltetem Propeller, dann ist der Anströmwinkel gleich dem Ruderwinkel δ_R . Die Bewegung mit einem Gierwinkel β und Drehung mit der Winkelgeschwindigkeit ω führt zu einer Änderung des Anströmwinkels, die die Abhängigkeit der Ruderkräfte von den Steuergrößen (β und Ω) bedingt.

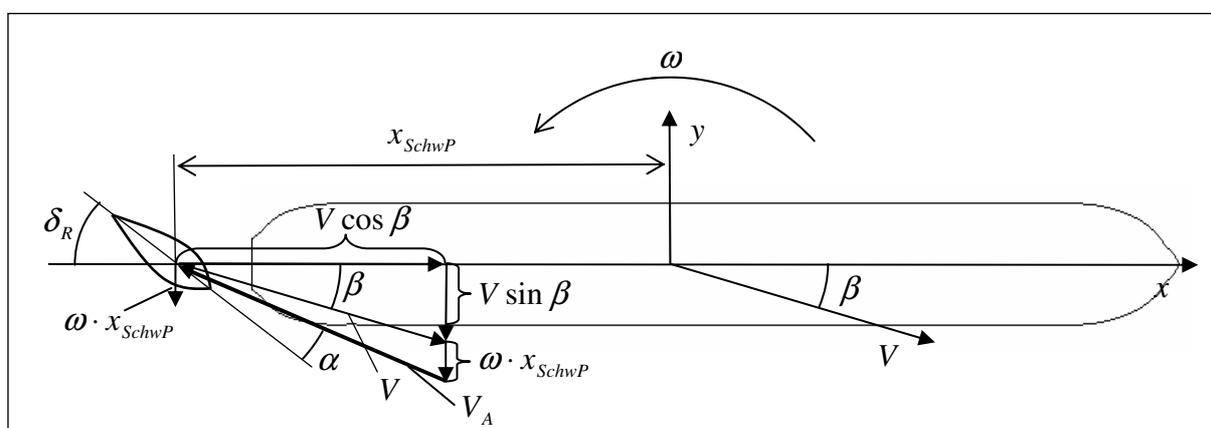


Bild 3.3 Strömung am Ruder

Die auf das Ruder wirkende Kraft wird durch den Ruderschaft auf den Schiffskörper übertragen. Diese Kraft hat in der Regel Komponenten in Schiffslängs- und Schiffsquerrichtung (X_R, Y_R) . Unter der Annahme, dass die Ruderkraft näherungsweise an der Ruderachse wirkt, ergibt sich das Moment N_R um die Hochachse des schiffsfesten Koordinatensystems nach Gl. (3.19).

$$N_R = -Y_R x_{SchwP} \quad (3.19)$$

Darin ist x_{SchwP} der Abstand zwischen dem Schwerpunkt des Systems „Schiffsmasse + hydrodynamische Masse“ und des Ruderschafts. Die Koeffizienten für die dimensionslosen Bewegungsgleichungen werden wie folgt definiert:

$$c_x^R = \frac{X_R}{\frac{\rho}{2} A_L V^2}, \quad c_y^R = \frac{Y_R}{\frac{\rho}{2} A_L V^2}, \quad c_n^R = \frac{N_R}{\frac{\rho}{2} A_L V^2 L}. \quad (3.20)$$

Wie schon erwähnt, sind die am Ruder auftretenden Kräfte von einer Reihe von Faktoren abhängig. Die Erfassung des Einflusses aller Faktoren auf die Ruderkraft ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. In der Praxis werden oft als erste Näherung die Einflüsse der Steuergrößen vernachlässigt, und es wird von einer linearen Abhängigkeit der Ruderkraft von dem Ruderwinkel ausgegangen. In dieser Arbeit wird die Ruderkraft als bekannt vorausgesetzt und der Einfluss der Strömung des fließenden Gewässers auf sie wird vernachlässigt.

3.2.1.3 Propellerkräfte

Die Propellerkräfte sind die Kräfte, die infolge Drehung des Propellers mit der Drehzahl n_p entstehen und durch die Propellerwelle auf den Schiffskörper übertragen werden. Diese Kräfte sind in der Regel von der Propellergeometrie, der Schiffsförmigkeit im Heckbereich, der Zustromgeschwindigkeit und der Propellerdrehzahl abhängig. Der Propeller erzeugt in der Schiffslängsrichtung den Schub, der im Zusammenspiel mit dem Schiffswiderstand das Erreichen einer konstanten Geschwindigkeit ermöglicht. Bedingt durch seine Konstruktion und Wirkungsweise

erzeugt der Schiffspropeller auch eine Querkraft und ein Moment um die Schiffshochachse. Diese Lasten werden in dieser Arbeit vernachlässigt. Die Propellerkraft in Längsrichtung X_p wird genau wie die Ruderkraft im weiteren Verlauf der Arbeit als bekannt vorausgesetzt. Der Propellerkraftbeiwert c_x^P berechnet sich daraus gemäß der Gleichung:

$$c_x^P = \frac{X_p}{\frac{\rho}{2} A_L V^2}. \quad (3.21)$$

3.2.2 Ermittlung des Querkraft- und des Giermomentbeiwerts

Die experimentelle und theoretische Ermittlung der bei der Bewegung eines Schiffes auftretenden äußeren Kräfte wurde in mehreren Publikationen behandelt.

Experimentell können die Kräfte mit Messungen an zwangsgeführten Modellen oder durch Versuche mit frei fahrenden Modellen bestimmt werden. Im ersten Fall werden Messungen der hydrodynamischen Kräfte und Momente in Abhängigkeit von Gierwinkel, Bahnkrümmung, Ruderwinkel und Propellerdrehzahl entweder in Rundlaufkanälen [Puls, 1977], [Kleinau, 1986] oder mit Planar-Motion-Mechanismen [Wolf, 1981], [Gronarz, 1997] durchgeführt. Der Anstieg der Querkraft und des Giermoments über den Gierwinkel kann auch in Windkanälen bestimmt werden. Versuche, mit Methoden der Systemidentifikation aus der Analyse gemessener Bewegungsabläufe frei fahrender Schiffe auf die Kräfte zu schließen, sind in [Oltmann, 1973, 1976] veröffentlicht.

In der Literatur sind auch mehrere empirische Ansätze für die Berechnung der auf den Schiffsrumpf wirkenden Kräfte und Momente veröffentlicht. Sie sind Ergebnis von statistischen Auswertungen von Messergebnissen. Bei den meisten Ansätzen werden charakteristische Schiffsparameter (Schiffslänge, Breite, Völligkeitsgrad usw.) [Lewis, 1989] sowie die Wassertiefe [Pavlenko, 1985], [Kijima, 2004] in vorgegebene Formeln eingesetzt, um die äußeren Lasten zu bestimmen. Es sind auch empirische Formeln veröffentlicht, die den Einfluss des Trimmwinkels auf die Lasten berücksichtigen [Mutzke, 1994].

Neben den experimentellen Methoden gewinnen theoretische Methoden zunehmend an Bedeutung für die Berechnung der infolge Manöver wirkenden Lasten. Dabei handelt es sich in der Regel um Methoden der CFD (Computational Fluid Dynamics (Numerische Fluidodynamik)). Die Kräfte lassen sich mithilfe des potenzialtheoretischen Paneelverfahrens [Puls, 1977], [Meyer, 1984] sowie mit der Finite-Volumen-Methode (FVM) [Gronarz, 1997], [El Moctar, 2001] berechnen. Anwendung hat auch die von Schmitz [Schmitz, 1961] erstmalig angewendete Impulsmethode gefunden. Auf letztere wird auch in dieser Arbeit zurückgegriffen.

Um die Schiffsbewegungen in Gebieten mit zweidimensionaler Strömungsverteilung zu untersuchen, wird eine Modularisierung der äußeren Kräfte vorgenommen, die schon in Kapitel 3.2.1.1 beschrieben wurde. Es wird weiterhin davon ausgegangen, dass die Querkomponenten der Auftriebskräfte mithilfe des Impulsverfahrens mit ausreichender Genauigkeit berechnet werden können. Die Kräfte infolge Querwiderstandseffekte werden mithilfe des Querwiderstandsbeiwertes erfasst. Dieser wird in dieser Arbeit auf Grundlage von Messergebnissen bestimmt.

Im Folgenden werden das Impulsverfahren und der Querwiderstand bei seitlicher Anströmung erläutert.

Bei der Anwendung des Impulsverfahrens wird wie bei der Berechnung der hydrodynamischen Masse davon ausgegangen, dass das Schiff ein schlanker Körper ist. Die Querkraftverteilung ergibt sich durch Anwendung des Impulssatzes als Reaktion der zeitlichen Änderung der hydrodynamischen Impulsverteilung [Schmitz, 1961]. Der hydrodynamische Impuls $dP(x)$ eines Streifens dx wird wie folgt definiert:

$$dP(x) = \bar{m}_y(x)v_y(x)dx. \quad (3.22)$$

Somit ergibt sich die Querkraft auf den Streifen dx zu:

$$\frac{Y_{HL}}{dx} = -\frac{D}{dt} \left(\frac{dP(x)}{dx} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} (\bar{m}_y(x)v_y(x)) - \frac{\partial}{\partial x} (\bar{m}_y(x)v_y(x)) \frac{dx}{dt}. \quad (3.23)$$

Die Berechnung der hydrodynamischen Massenverteilung $\bar{m}_y(x)$ wurde in Kapitel 3.1.2 behandelt. Die Quergeschwindigkeitsverteilung $v_y(x)$ des Schiffes relativ zum Wasser ergibt sich einerseits aus der Bewegung des Schiffes mit Gierwinkel und Drehung um die Hochachse und andererseits aus der Verteilung der Querkomponente der Gewässerströmung über die Schiffslänge $V_{sy}(x)$.

$$v_y(x) = -V \sin \beta + \omega \cdot x - V_{sy}(x) \quad (3.24)$$

Bei der Einführung der dimensionslosen Bahnkrümmung Ω anstelle der Winkelgeschwindigkeit ω und unter der Annahme eines kleinen Gierwinkels kann die obige Formel wie folgt geschrieben werden:

$$v_y(x) = -V \left(\beta - \frac{x}{L} \Omega + \frac{V_{sy}(x)}{V} \right). \quad (3.25)$$

Der Ausdruck in den Klammern wird örtlicher Anstellwinkel $\beta(x)$ der Relativgeschwindigkeit gegen das Schiff über die Schiffslängsachse genannt [Puls, 1977].

Bei kleinen Gierwinkeln gilt weiterhin:

$$\frac{dx}{dt} = -V \cos \beta \approx -V. \quad (3.26)$$

Die auf das Schiff wirkende Querkraft sowie das Giermoment werden durch Integration der Querkraftverteilung über die Schiffslänge ermittelt:

$$Y_{HL} = - \int_{x_{Heck}}^{x_{Bug}} \frac{D}{dt} \left(\frac{dP(x)}{dx} \right) dx, \quad N_{HL} = - \int_{x_{Heck}}^{x_{Bug}} \frac{D}{dt} \left(\frac{dP(x)}{dx} \right) x dx. \quad (3.27)$$

Die so dargestellten Formeln sind für eine drehungs- und reibungsfreie Flüssigkeit gültig. Der Einfluss der Zähigkeit des Fluids auf die Querkraft bei Bewegung im ruhenden Wasser wird durch das Einführen einer Abflussbedingung [Schmitz, 1961]

berücksichtigt. Dabei wird davon ausgegangen, dass im Heckbereich des Schiffes nur eine teilweise Rücklenkung des Impulses stattfindet. Schmitz nimmt an, dass dies für den Bereich des Schiffes hinter dem Maximum der hydrodynamischen Massenverteilung der Fall ist.

Die nach der Impulsmethode ohne Berücksichtigung der Gewässerströmung ermittelten Querkräfte und Giermomente hängen linear von β und Ω ab. Experimente mit Schiffsmodellen (siehe Kapitel 4) zeigen, dass die Querkraft mit dem Gierwinkel stärker als linear wächst. Diese Nichtlinearität kann offensichtlich mit dem Querwiderstand erklärt werden [Puls, 1987]. Im Bereich der Körperoberfläche mit starken Krümmungen oder scharfen Kanten kommt es bei einer parallelen Umströmung zur Grenzschichtablösung. Es bilden sich Trennungsschichten aus, die den Querwiderstand hervorrufen. Für schlanke Schiffe hat es sich nach [Puls, 1987] als zuverlässig erwiesen, dem linearen Anteil von Querkraft und Giermoment additiv einen Anteil zu überlagern, der durch den Widerstand der Querschnitte infolge Queranströmung erklärt wird.

Ist $C_w(x)$ der Widerstandsbeiwert eines Querschnittes und $T(x)$ der örtliche Tiefgang, dann ist der nichtlineare Anteil dY_{HC} der Querkraft auf ein Element der Länge dx :

$$dY_{HC} = C_w(x) \frac{1}{2} \rho \cdot T(x) \cdot v_y^2(x) \operatorname{sgn} v_y(x) dx. \quad (3.28)$$

Die auf das Schiff wirkende nichtlineare Querkraft sowie das nichtlineare Giermoment werden durch Integration der Querkraftverteilung $Y_{HC}(x)$ über die Schiffslänge berechnet. Die Richtung der Kraft hängt von der Richtung der Quergeschwindigkeit ab.

Die theoretische Bestimmung der $C_w(x)$ -Werte ist aufgrund der Ausbildung eines Ablösegebietes hinter dem quer angeströmten Profil problematisch, da die Strömungsablösung in Abhängigkeit von der Reynoldszahl an verschiedenen Stellen eintritt. Messergebnisse für bestimmte Schiffsquerschnitte sind in [Puls, 1977] und [Edwards, 1985] veröffentlicht. Im Rahmen dieser Arbeit werden die

Querwiderstandsbeiwerte mithilfe von Messungen im Windkanal bestimmt. Diese Messungen werden im Kapitel 4 vorgestellt.

Die oben gezeigten Formeln für die Auftriebskräfte und die Kräfte infolge Querwiderstandseffekten ermöglichen die theoretische Berechnung der an dem Schiffsrumpf angreifenden Kräfte bei einer bekannten, unregelmäßigen Quergeschwindigkeitsverteilung $v_y(x)$. Voraussetzung dafür sind eine bekannte Verteilung der hydrodynamischen Massen $\bar{m}_y(x)$ sowie eine bekannte Verteilung des Querwiderstandsbeiwertes $C_w(x)$.

3.3 Implementierung der Koeffizienten im mathematischen Modell

In diesem Kapitel werden die in den Kapiteln 3.1. und 3.2 beschriebenen Koeffizienten in die Bewegungsgleichungen (2.11) eingefügt. Dabei werden zunächst die Polynome für die Berechnung der Rumpfkkräfte und -momente auf Grundlage der theoretischen Ansätze, dargestellt in Kapitel 3.2, hergeleitet.

Die linearen Kräfte ergeben sich durch Einsetzen von Gleichung (3.25) in (3.23) zu:

$$Y_{HL} = - \int_L \left[\frac{\partial}{\partial t} (\bar{m}_y(x) v_y(x)) - \frac{\partial}{\partial x} (\bar{m}_y(x) v_y(x)) \frac{dx}{dt} \right] dx. \quad (3.29)$$

Die Kräfte aus der lokalen Beschleunigung der hydrodynamischen Reaktion (d.h. der erste Term in den Klammern in Gleichung (3.29)) über die Zeit ergeben sich zu:

$$\int_L \left[\frac{\partial}{\partial t} (\bar{m}_y(x) v_y(x)) \right] dx = - \int_L \bar{m}_y(x) \frac{d(V \sin \beta)}{dt} dx + \int_L \bar{m}_y(x) \frac{d\omega}{dt} x dx - \int_L \bar{m}_y(x) \frac{d(V_{Sy}(x,t))}{dt} dx. \quad (3.30)$$

Da der Koordinatenursprung des körperfesten Koordinatensystems im gemeinsamen Schwerpunkt der Schiffsmasse und der hydrodynamischen Masse liegt, ist das

Integral $\int_L \bar{m}_y(x) \dot{\omega} x dx \approx 0$, so dass der mathematische Ausdruck (3.30) die folgende Form annimmt:

$$\int_L \left[\frac{\partial}{\partial t} (\bar{m}_y(x) v_y(x)) \right] dx = -m_y (\dot{V} \sin \beta + V \cos \beta \dot{\beta}) - \int_L \bar{m}_y(x) \frac{dV_{sy}(x,t)}{dt} dx. \quad (3.31)$$

Das Moment, das sich aus der lokalen Ableitung des hydrodynamischen Impulses ergibt, wird berechnet, indem die Ausdrücke in den Integralen in Gleichung (3.30) mit x multipliziert werden. Bei einer Integration über die Schiffslänge der mit x multiplizierten Ausdrücken in den Integralen auf der rechten Seite in Gleichung (3.30) ergeben sich aus dem ersten Integral keine Momente.

$$\int_L \left[\frac{\partial}{\partial t} (\bar{m}_y(x) v_y(x)) \right] x dx = I_{nz} \dot{\omega} - \int_L \bar{m}_y(x) \frac{dV_{sy}(x,t)}{dt} x dx \quad (3.32)$$

Die nach Formeln (3.31) und (3.32) berechneten Lasten stellen Trägheitskräfte und - Momente dar. Eingesetzt in die Bewegungsgleichungen führen diese zu einer Verdopplung der hydrodynamischen Trägheitskräfte bzw. -momente in der Gleichung in Schiffsquerrichtung bzw. in der Momentengleichung.

Aus der konvektiven Beschleunigung in Gleichung (3.29) ergibt sich eine Abhängigkeit der Kräfte von β , von ω bzw. Ω sowie von der Verteilung der äußeren Strömung $V_{sy}(x)$ über die Schiffslänge. Sie kann wie folgt mathematisch ausgedrückt werden:

$$\int_L \frac{\partial}{\partial x} (\bar{m}_y(x) v_y(x)) V \cos \beta dx = c_y^\beta \beta \frac{\rho}{2} V^2 A_L + c_y^\Omega \Omega \frac{\rho}{2} V^2 A_L - V \cos \beta \int_L \frac{\partial}{\partial x} (\bar{m}_y(x) V_{sy}(x)) dx. \quad (3.33)$$

Die Berechnung der Konstanten c_y^β und c_y^Ω unter Berücksichtigung bestimmter Abflussbedingungen wurde in [Schmitz, 1961, 1980] sowie [Puls, 1977, 1984] und [Kleinau, 1986] behandelt. Dafür wird die hydrodynamische Massenverteilung über die Schiffslänge benötigt. Da diese unter anderem von der Schiffsform und der

Wassertiefe abhängig ist, wird der Einfluss dieser beiden Größen bei der Berechnung der Kräfte automatisch mit berücksichtigt. Der letzte Term in Gleichung (3.33) stellt die Auftriebskräfte infolge Gewässerströmung Y_{HL}^S dar.

$$Y_{HL}^S = -V \cos \beta \int_L \left(\bar{m}_y(x) \frac{\partial V_{sy}}{\partial x} + V_{sy}(x) \frac{d\bar{m}_y(x)}{dx} \right) dx \quad (3.34)$$

Um die Abflussbedingung und somit der Einfluss der Zähigkeit und der Wirbelbildung zu berücksichtigen, wird zunächst die Integration nur im Bereich des Schiffes vor dem Maximum der hydrodynamischen Massenverteilung vorgenommen. Um eine teilweise Rücklenkung des hydrodynamischen Impulses im Heckbereich zu erfassen, wird ein Faktor ε eingeführt [Puls, 1977]. Mit dem Faktor ε wird das Integral (3.34) bei der Integration im Bereich hinter dem Maximum der hydrodynamischen Massenverteilung multipliziert. Nach [Puls, 1977] werden ungefähr 10% des Impulses umgelenkt. Damit ergibt sich $\varepsilon = 0,1$.

Der Anstieg der hydrodynamischen Masse über die Schiffslänge $d\bar{m}_y(x)/dx$ (siehe Bild 5.3) führt zu einer Impulsrücklenkung nur im Heckbereich des Schiffes. Diese wird mit dem Faktor ε erfasst.

Da die Gewässerströmung in der Regel eine unregelmäßige Verteilung aufweist (siehe Bild 4.18 bzw. 5.3), kann es infolge des Anstiegs dieser Strömung $\partial V_{sy} / \partial x$ bezüglich des schiffsfesten Koordinatensystems auch im Bugbereich theoretisch zu einer Impulsrücklenkung kommen. Im Bugbereich ist die Querkraft, die sich aus dem Anstieg der hydrodynamischen Masse ergibt, d.h. der zweite Term in dem Integral in Gleichung (3.34) stets in Richtung der Strömungsgeschwindigkeit gerichtet. Zu einer Impulsrücklenkung kommt es nur dann, wenn der Anstieg der äußeren Strömung ein anderes Vorzeichen besitzt als die Geschwindigkeit der Gewässerströmung (siehe erster Term im Integral in Gleichung (3.34)). Da davon ausgegangen wird, dass die Impulsrücklenkung nur in geringerem Maße stattfindet, wird hierfür im Bugbereich der Faktor ε_{Bug} eingeführt. Mit diesem Faktor wird der Term multipliziert, der den Anstieg der äußeren Strömung beinhaltet, um die obere Annahme mathematisch zu berücksichtigen.

Werden die Faktoren ε und ε_{Bug} in Gleichung (3.34) eingesetzt, ergibt sich für die Querkraft Y_{HL}^S :

$$Y_{HL}^S = -V \cos \beta \left\{ \varepsilon \int_{x_{Heck}}^{x=0} \left(\bar{m}_y(x) \frac{\partial V_{Sy}}{\partial x} + V_{Sy}(x) \frac{d\bar{m}_y(x)}{dx} \right) dx + \int_0^{x_{Bug}} \left(\varepsilon_{Bug} \bar{m}_y(x) \frac{\partial V_{Sy}}{\partial x} + V_{Sy}(x) \frac{d\bar{m}_y(x)}{dx} \right) dx \right\}. \quad (3.35)$$

Für den Faktor ε_{Bug} werden die folgenden Werte zugrunde gelegt:

$$\varepsilon_{Bug} = 1 \quad \text{für} \quad \text{sgn} \left(\frac{\partial V_{Sy}}{\partial x} \right) \neq \text{sgn}(V_{Sy}), \quad (3.36)$$

$$\varepsilon_{Bug} = 0,1 \quad \text{für} \quad \text{sgn} \left(\frac{\partial V_{Sy}}{\partial x} \right) = \text{sgn}(V_{Sy}).$$

Das Moment infolge Gewässerströmung N_{HL}^S ergibt sich durch Multiplikation der Ausdrücke in den Integralen in Gleichung (3.35) mit x .

Die Kraft infolge Querumströmung der einzelnen Querschnitte ergibt sich aus Gleichung (3.28). In dimensionsloser Form kann für diese Kraft das folgende Polynom geschrieben werden:

$$\frac{Y_{HC}}{\frac{\rho}{2} A_L V^2} = c_y^{\beta\beta} \beta^2 + c_y^{\Omega\Omega} \Omega^2 + c_y^{\beta\Omega} \beta\Omega + c_y^{\beta V_{Sy}} \beta + c_y^{\Omega V_{Sy}} \Omega + c_y^{V_{Sy}}. \quad (3.37)$$

Die Koeffizienten sind nicht konstant über die Zeit, da sie einerseits von der unregelmäßigen Gewässerströmung (nur bei $c_y^{\beta V_{Sy}}$, $c_y^{\Omega V_{Sy}}$ und $c_y^{V_{Sy}}$) und andererseits von der Richtung der Geschwindigkeit $v_y(x)$ abhängig sind. Aus diesem Grund

müssen die Koeffizienten nach jedem Zeitschritt neu berechnet werden. Die Formeln zur Berechnung der Koeffizienten sind im Anhang dargestellt.

Das nichtlineare Moment ergibt sich durch Multiplikation der Kraft in Gleichung (3.28) mit x und nachfolgende Integration dieser Kraft über die Schiffslänge. Das Polynom hat die gleiche Form wie Gleichung (3.37):

$$\frac{N_{HC}}{\frac{\rho}{2} A_L L V^2} = c_n^{\beta\beta} \beta^2 + c_n^{\Omega\Omega} \Omega^2 + c_n^{\beta\Omega} \beta \Omega + c_n^{\beta V_{Sy}} \beta + c_n^{\Omega V_{Sy}} \Omega + c_n^{V_{Sy}}. \quad (3.38)$$

Um die Polynome zu vervollständigen, wird das instabile Moment in die Momentengleichung eingefügt. Das instabile Moment wird wie folgt definiert:

$$M_{inst.} = (m_y - m_x) \frac{V^2}{2} \sin 2\beta \approx (m_y - m_x) V^2 \beta. \quad (3.39)$$

Nach [Puls, 1987] tritt das instabile Moment in realer Flüssigkeit nur mit ungefähr der halben Größe des für eine reibungsfreie Flüssigkeit geltenden Wertes in Gleichung (3.39) auf. Wird das instabile Moment dimensionslos gemacht und halbiert, ergibt sich:

$$\frac{0,5M_{inst.}}{\frac{\rho}{2} A_L L V^2} = 0,5(\hat{\kappa}_y - \hat{\kappa}_x) \beta. \quad (3.40)$$

Das instabile Moment infolge Gewässerströmung ergibt sich gemäß Gleichungen (2.4), (2.5.) und (2.6) zu:

$$M_{inst.}^{Strom} = -V \cos \beta \int_L \bar{m}_y(x) V_{Sy}(x) dx + V \sin \beta \cdot m_x V_{Sx}. \quad (3.41)$$

Die dimensionslosen Bewegungsgleichungen ergeben sich durch Einsatz der dimensionslosen Polynome für die Rumpflasten, der dimensionslosen instabilen

Momente sowie der Koeffizienten, die die Kräfte und die Momente der Propulsions- und Steuerorgane modellieren, in Gleichung (2.11):

$$\begin{aligned} \kappa_x \cos \beta \frac{V'}{V} - \kappa_x \beta' \sin \beta + \kappa_y \sin \beta \Omega = & -\frac{R_T(V, \beta, \Omega)}{\frac{\rho}{2} A_L V^2} + c_x^R + c_x^P + \frac{V'_{Sx}}{V} \hat{\kappa}_x + \frac{\int_L \bar{m}_y \frac{V_{Sy}}{V} dx}{\frac{\rho}{2} A_L L} \Omega, \\ -(\kappa_y + \hat{\kappa}_y) \sin \beta \frac{V'}{V} - (\kappa_y + \hat{\kappa}_y) \cos \beta \beta' + \kappa_x \cos \beta \Omega = & (c_y^\beta + c_y^{\beta V_{Sy}}) \beta + (c_y^\Omega + c_y^{\Omega V_{Sy}}) \Omega + \\ & c_y^{\beta\beta} \beta^2 + c_y^{\Omega\Omega} \Omega^2 + c_y^{\beta\Omega} \beta \Omega + c_y^S + c_y^{V_{Sy}} + c_y^R + 2 \frac{\int_L \bar{m}_y \frac{V'_{Sy}}{V} dx}{\frac{\rho}{2} A_L L} + \hat{\kappa}_x \frac{V_{Sx}}{V} \Omega \end{aligned} \quad (3.42)$$

$$\begin{aligned} \mu \frac{V'}{V} \Omega + (\mu + \hat{\mu}) \Omega' = & \left(c_n^\beta + c_n^{\beta V_{Sy}} + 0,5(\hat{\kappa}_y - \hat{\kappa}_x) - 0,5 \hat{\kappa}_x \frac{V_{Sx}}{V} \right) \beta - (c_n^\Omega - c_n^{\Omega V_{Sy}}) \Omega + c_n^{\beta\beta} \beta^2 + \\ & c_n^{\Omega\Omega} \Omega^2 + c_n^S \beta \Omega + c_n^S + c_n^{V_{Sy}} + c_n^R + 2 \frac{\int_L \bar{m}_y \frac{V'_{Sy}}{V} x dx}{\frac{\rho}{2} A_L L^2} + \frac{\int_L \bar{m}_y(x) V_{Sy}(x) dx}{\frac{\rho}{2} A_L L V} \end{aligned} \quad .$$

Die Koeffizienten c_y^S bzw. c_n^S stellen den linearen Anteil der Kraft bzw. des Momentes infolge Strömung in dimensionsloser Form dar. Die Koeffizienten $c_y^{\beta V_{Sy}}$, $c_y^{\Omega V_{Sy}}$ und $c_y^{V_{Sy}}$ bzw. $c_n^{\beta V_{Sy}}$, $c_n^{\Omega V_{Sy}}$ und $c_n^{V_{Sy}}$ erfassen den Einfluss der äußeren Strömung auf die nichtlinearen Kräfte bzw. Momente. Die Bedeutung der übrigen Koeffizienten wurde bereits in den Abschnitten 3.1 und 3.2 erläutert.

4 Modellversuche

Das Ziel der Modellversuche ist es, die Genauigkeit und die Grenzen der Einsetzbarkeit des vorgestellten mathematischen Modells zu überprüfen. Diese Zielstellung kann in zwei Teilaufgaben unterteilt werden. Zum einen sollen die Querkraft und das Giermoment am Modell eines Unterwasserschiffs sowie der Querwiderstandsbeiwert $C_w(x)$ des parallelen Mittelschiffes unter Berücksichtigung der Wassertiefe ermittelt werden. Zum anderem soll eine genaue Ermittlung der Bahn eines frei fahrenden Schiffsmodells vorgenommen werden. Dazu soll der zeitliche Verlauf von Gierwinkel, Bahnkrümmung, Kurswinkel und Modellgeschwindigkeit aufgezeichnet werden. Der wissenschaftliche Schwerpunkt der zweiten Teilaufgabe ist die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von experimentellen Untersuchungen zur Durchfahrt eines Schiffsmodells durch eine Teststrecke mit einem seitlichen Zufluss und begrenzter Wassertiefe.

Eine Übersicht über die Methoden zur experimentellen Ermittlung der auf den Schiffsrumpf wirkenden Kräfte wurde schon im Abschnitt 3.2.2 dargestellt. Untersuchungen zur Bestimmung des Querwiderstandsbeiwertes in tiefem Wasser wurden von [Puls, 1977] durchgeführt. In der vorliegenden Arbeit wurde der Einfluss der Wassertiefe auf den Querwiderstandsbeiwert untersucht.

Die experimentelle Ermittlung des Ablaufes gesteuerter Bewegungen von frei fahrenden Schiffsmodellen wurde von [Puls, 1977] und [Paschen, 1981] behandelt. Die Simulation der Durchfahrt durch ein Gebiet mit Gewässerströmung wurde jedoch nach Kenntnis des Autors noch nicht in der Literatur veröffentlicht.

4.1 Modellversuche im Windkanal

Die Versuche zur Ermittlung der Querkraft und des Momentes um die Hochachse am gesamten Unterwasserschiff sowie des Querwiderstandsbeiwertes des parallelen Mittelschiffes unter Berücksichtigung der begrenzten Wassertiefe wurden in einem Windkanal durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche werden für die Validierung des Impulsverfahrens und des Querwiderstandskonzeptes benötigt.

Um Aussagen über die auf einen Schiffsrumpf wirkenden Kräfte mithilfe von Modellversuchen treffen zu können, muss die Umströmung des Modells die Umströmung der Großausführung möglichst genau nachbilden. Die Bewegung eines manövrierenden Schiffes ist in der Regel ungleichförmig. Für generelle Aussagen ist jedoch zunächst die Betrachtung einer gleichförmigen Bewegung ausreichend, da die zu validierenden Methoden unter anderem die Kräfte bei einer solchen Bewegung berechnen können. Bei einer gleichförmigen Bewegung ist nur die Relativbewegung zwischen Fluid und Körper für die Ausbildung der Umströmung und die daraus resultierenden Kräfte maßgeblich. Daher kann die Umströmung eines gleichförmig bewegten Objektes durch die Anströmung eines stehenden Modells in einem Strömungskanal simuliert werden. Ein wesentlicher Vorteil bei einem fixierten Modell gegenüber einem bewegten ist, dass eine viel kürzere Messstrecke benötigt wird. Dies führt zu einem deutlich kleineren Materialaufwand für die Herstellung des Messstandes. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist, dass nur die Geradeausfahrt unter einem Gierwinkel untersucht werden kann.

Bei der Auswertung und Übertragung der Ergebnisse auf die Großausführung ist auf die Ähnlichkeitskriterien bzw. -kennzahlen zu achten [Schneekluth, 1988]. Die beiden wesentlichen Kennzahlen für Modellversuche mit Schiffen sind die Reynoldszahl und die Froudezahl. Die Reynoldszahl $Rn = VL/\nu$ mit der kinematischen Viskosität ν stellt das Verhältnis von den Trägheitskräften zu den Zähigkeitskräften dar und ist damit für die zähigkeitsbedingten Lasten maßgeblich. Die Froudezahl $Fn = V/\sqrt{gL}$ stellt das Verhältnis von den Trägheitskräften zu den Gewichtskräften dar und beschreibt damit die Wellenausbildung. Bei Versuchen mit Modellen, bei denen der Maßstabsfaktor ungleich 1 ist, ist die gleichzeitige Einhaltung der beiden Kennzahlen nicht möglich, vorausgesetzt die Versuche werden im selben Medium durchgeführt.

Aufgrund der niedrigen Geschwindigkeit von Binnenschiffen von etwa 4 m/s und einer Schiffslänge von etwa 100 m ergibt sich eine kleine Froudezahl von zirka 0,13. Damit kann die Verformung der glatten Wasseroberfläche durch die Schiffsbewegung bei der Bestimmung der Querkraft sowie des Moments um die Hochachse vernachlässigt werden [Kleinau, 1986]. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, die Umströmung des Körpers in nur einem Medium zu betrachten, wobei

die ungestörte Wasseroberfläche durch eine nicht durchströmte Fläche ersetzt wird. An dieser Stromfläche gilt die Randbedingung, dass die Fluidgeschwindigkeit normal zur Wasseroberfläche verschwinden muss. Im Abschnitt 3.1.2 wurde diese Bedingung durch die Spiegelung des Schiffskörpers an der ungestörten Wasseroberfläche erfüllt. Bei Modellversuchen im Windkanal kann die Wasseroberfläche durch eine starre, undurchlässige Platte modelliert werden. Das Flussbett wird ebenfalls nicht durchströmt und kann somit durch eine weitere Platte modelliert werden. Daher kann die Umströmung eines sich gleichförmig bewegenden Schiffes nachgebildet werden, indem ein fixiertes Modell des Unterwasserschiffes zwischen zwei Platten angeströmt wird. Die Platten müssen parallel zur Strömung angeordnet werden, da davon ausgegangen wird, dass sich das Schiff parallel zu der glatten Oberfläche bewegt (siehe Kapitel 1). Um den Einfluss der Wassertiefe zu untersuchen, wird bei den Messungen der Abstand zwischen den Platten variiert.

Die Umströmung eines fixierten Körpers in nur einem Medium kann im Windkanal realisiert werden. Dabei werden die aerodynamischen Lasten auf ein im Windkanal angeströmtes Modell bestimmt. Die hydrodynamischen Lasten auf ein sich im Wasser bewegendes Schiff können anhand der im Windkanal gewonnenen Beiwerte für die aerodynamischen Lasten unter Berücksichtigung der Ähnlichkeitskennzahlen ermittelt werden. Bei einer Vernachlässigung der Wellenbildung ist die Reynoldszahl die maßgebende Ähnlichkeitskennzahl. Das Verhältnis zwischen den kinematischen Viskositäten von Luft und Wasser bei 20°C, $\nu_L = 15,11 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ bzw. $\nu_w = 1,004 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, beträgt etwa 15 [Schmitz, 1961]. Daraus ergibt sich, dass die Anströmgeschwindigkeit in einem Windkanal um den Faktor 15 größer sein muss als im Wasser, um beim gleichen Modell dieselbe Reynoldszahl zu realisieren. Um die Ergebnisse auf die Großausführung unter Berücksichtigung der Reynoldszahl übertragen zu können, muss die Schiffsgeschwindigkeit mit dem Modellmaßstab und dem Verhältnis zwischen den kinematischen Viskositäten von Luft und Wasser multipliziert werden, um die Anströmgeschwindigkeit im Windkanal zu berechnen.

4.1.1 Versuchsaufbau

Die Messungen wurden im Windkanal des Lehrstuhls für Meerestechnik an der Universität Rostock durchgeführt. Diese Einrichtung ist ein Windkanal Göttinger Bauart mit einer offenen Messstrecke. Die Messstrecke ist 2,8 m lang und hat einen quadratischen Querschnitt von 1,4 m x 1,4 m. Die maximale Windgeschwindigkeit beträgt 64 m/s.

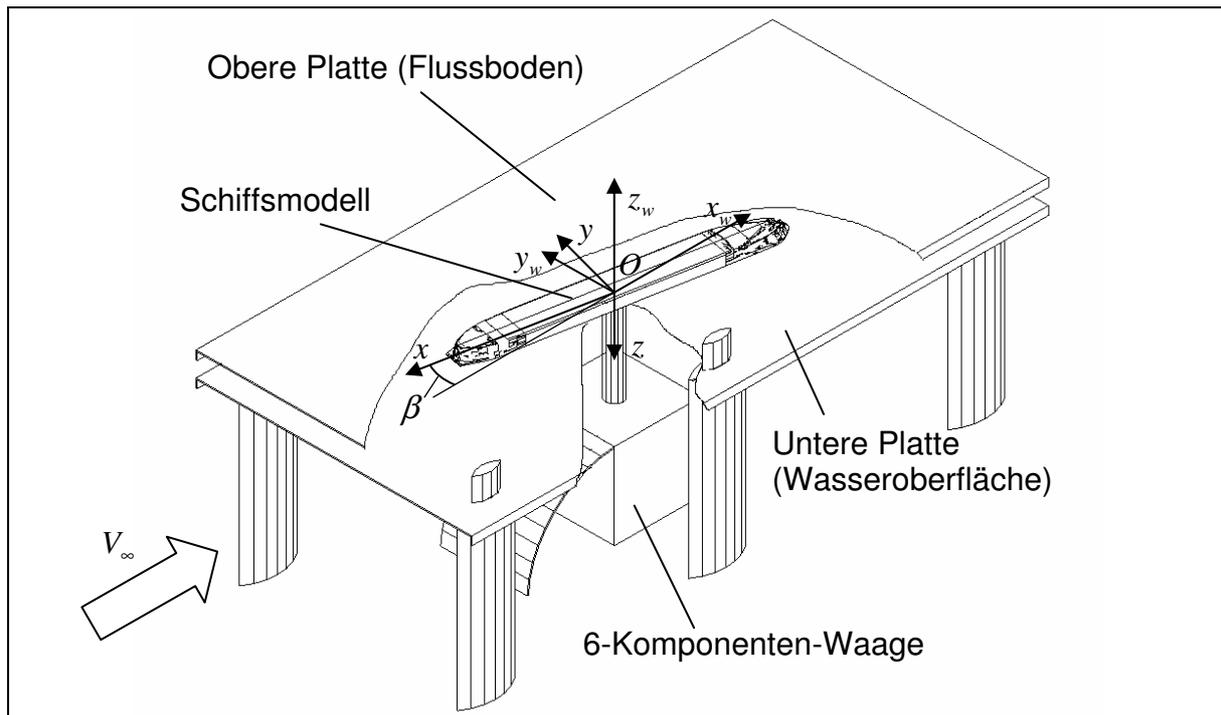


Bild 4.1 Versuchsstand und Koordinatensysteme im Windkanal

Das eingesetzte Modell bildet den Unterwasserkörper der MS-Main im Maßstab 1:100 ab. Die Modellhöhe T beträgt 28 mm, die Modellbreite B beträgt 110 mm und die Modelllänge L beträgt 1 m. Der Versuchsstand ist im Bild 4.1 dargestellt. Das Modell ist zwischen zwei Platten an seinem Schwerpunkt am Schaft einer 6-Komponenten-Waage befestigt [Paschen, Winkel, Schröder, 2003]. Die Waage ist unter den Platten angeordnet und strömungsgünstig verkleidet, um Fremdeinflüsse der Strömung auf diese zu vermeiden. Der Schaft der Waage reicht bis zur unteren Platte. Das Modell ist so angebracht, dass der Boden in die entgegengesetzte Richtung im Vergleich zu einem schwimmenden Modell zeigt. Dadurch ist die positive z -Richtung des körperfesten Koordinatensystems nach unten gerichtet (siehe Bild 4.1). Das ist erforderlich, da der Boden des Modellschiffs frei umströmt werden muss und damit keine Halterung für das Modell auf dieser Seite angebracht

werden kann. Da die Wasseroberfläche ohnehin nicht umströmt werden darf, bietet sich diese Fläche zur Montage an der Waage an. Durch die Lage der Waage im Windkanal unter der Messtrecke ergab sich die Ausrichtung des Modells. Mit so einer Ausrichtung des Koordinatensystems bildet die untere Platte (Abmessungen im Bild 4.4) die Wasseroberfläche und die obere das Flussbett nach.

Bei der Anbringung des Schiffsmodells an dem Schaft der Waage soll der Luftspalt zwischen dem Modell und der unteren Platte möglichst klein eingestellt werden. Das Modell darf dabei jedoch an keiner Stelle aufliegen, da die durch die Strömung induzierten Kräfte und Momente an die Waage übertragen und nicht mindestens teilweise undefiniert in die Platte eingeleitet werden sollen. Dabei müssen auch elastische Deformationen des Schaftes der Waage mit berücksichtigt werden, die die Ursache geringfügiger Kippbewegungen des Modells sind. Diese dürfen nicht zum Anliegen des Schiffsmodells an der Platte führen [Schreier, 2003].

Aus diesen Forderungen wurde das Modell 2 mm oberhalb der unteren Platte angebracht. Dieser Luftspalt wirkt nicht nachteilig auf die Messungen, da die Grenzschicht (Bild 4.3) am Ort des Modells dicker als der Spalt ist, wodurch eine Durchströmung des Spaltes verhindert wird.

Zur Simulation unterschiedlicher Wassertiefen wurde der Abstand H zwischen den Platten in 4 Stufen variiert ($H = 42\text{mm}, 62\text{mm}, 84\text{mm}, 104\text{mm}$). Ein Plattenabstand von 42 mm entspricht unter Berücksichtigung des Luftspaltes zwischen dem Modell und der unteren Platte einer Wassertiefe von 4 Meter bei der Großausführung. Dies entspricht der Entwurfswassertiefe, die bei der Wartung der Wasserstraßen berücksichtigt wird. Nach [Kleinau, 1986] lässt der Einfluss der Wassertiefe auf die Kräfte bei einer Wassertiefe größer als der drei- bis vierfache Tiefgang nach. Daher ergibt sich auch die obere Grenze bei den Plattenabständen. Gemessen wurde auch ohne obere Platte, um die Kräfte und Momente bei unendlicher Wassertiefe zu erfassen.

Der Versuchsstand wurde mit einer Geschwindigkeit V_∞ von 20 m/s angeströmt. Voruntersuchungen mit höheren Geschwindigkeiten haben keinen wesentlichen Einfluss auf die Beiwerte ergeben. Durch die Anströmung bilden sich an den Platten Grenzschichten aus. Dadurch wird das Modell mit einer Geschwindigkeit angeströmt,

die ein ungleichförmiges Profil über die Hochachse aufweist. Die Geschwindigkeitsprofile über die Hochachse wurden im Ursprung des raumfestem Koordinatensystems und am hinteren Ende der Platten ($x_w = 900\text{mm}$; $y_w = 0$) vor der Durchführung der Kraftmessungen mittels Hitzdrahtmesstechnik ermittelt. Die gemessenen Geschwindigkeitsprofile sind in den Bildern 4.2 und 4.3 dargestellt.

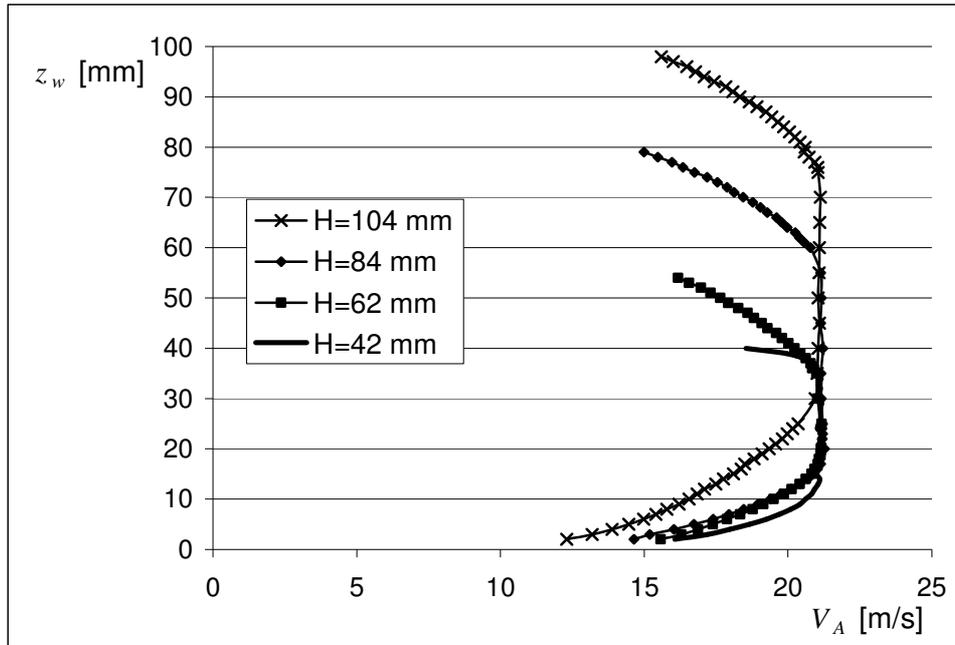


Bild 4.2 Geschwindigkeitsprofile bei $x_w = 900\text{mm}$; $y_w = 0$

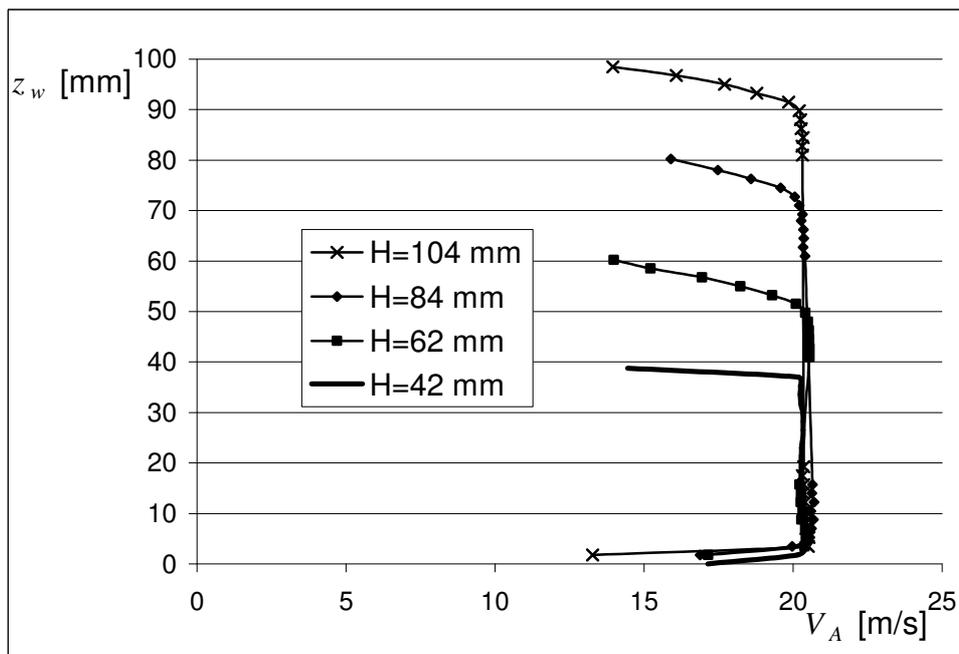


Bild 4.3 Geschwindigkeitsprofile bei $x_w = 0$; $y_w = 0$

Das Modell wurde unter dem Winkel β angeströmt. Der Winkel wurde im Bereich von -20° bis 20° in Schritten von jeweils 5° variiert.

Da sich die Bewegungsgleichungen auf ein körperfestes Koordinatensystem $Oxyz$ beziehen, sind auch die Kräfte bezüglich des körperfesten Koordinatensystems von Interesse. Der Ursprung des körperfesten Koordinatensystems befindet sich im Schwerpunkt des Modells. Die Kräfte F_x und F_y in die jeweilige Richtung des raumfesten Koordinatensystems $Ox_w y_w z_w$ sowie das Moment um die z_w -Achse M_z werden mithilfe der 6-Komponenten-Waage gemessen. Der Ursprung des Koordinatensystems der Waage befindet sich im obersten Punkt des Schafts der 6-Komponenten-Waage. Die positive x-Richtung des waagenfesten Koordinatensystems entspricht der Strömungsrichtung während der Versuche.

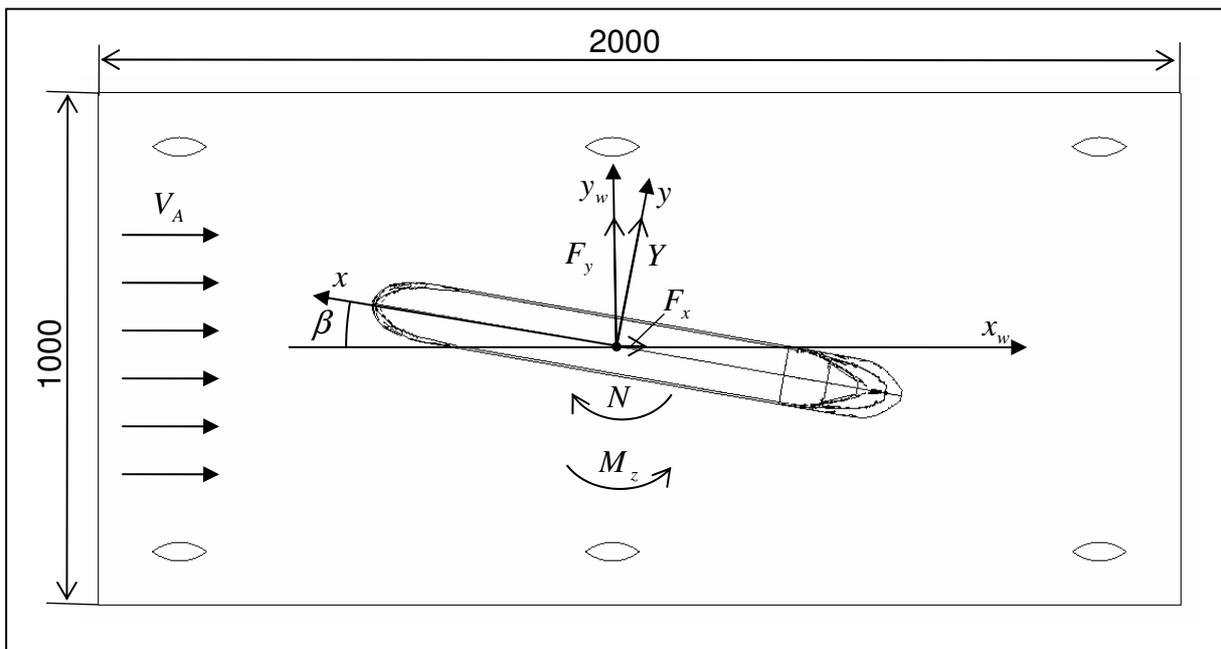


Bild 4.4 Versuchsstand, Ansicht von oben (ohne die obere Platte, Abmessungen in mm)

Die Kraft in Modellquerrichtung Y und das Moment um die Modellhochachse N werden gemäß Bild 4.4 wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned}
 Y &= F_x \sin \beta + F_y \cos \beta \\
 N &= -M_z
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

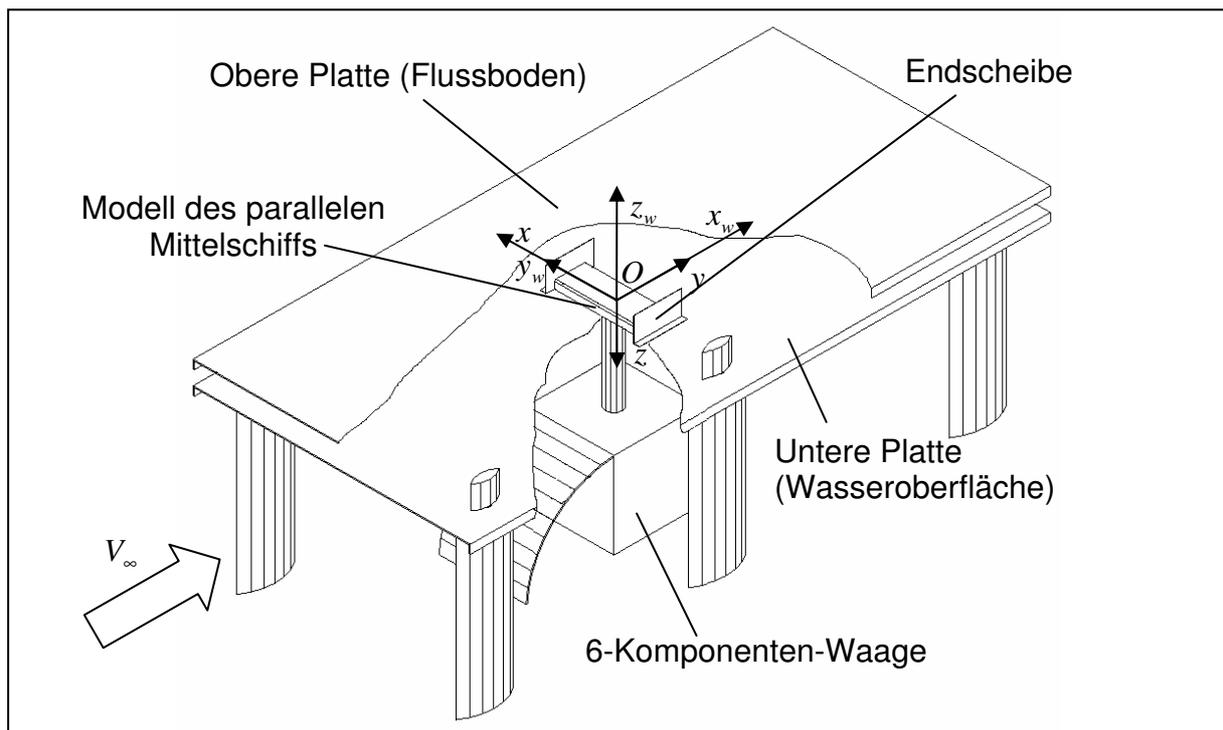


Bild 4.5 Versuchsaufbau für die Messung des Querwiderstandes

Für die experimentelle Bestimmung des reinen Querwiderstandes Y_Q des parallelen Mittelschiffes wurde ein Modell dieses Bereiches mit einer Länge $L_{MS}=300$ mm gefertigt und quer zu der Strömungsrichtung zwischen den Platten am Schaft der 6-Komponenten-Waage angebracht. Um eine ebene Umströmung des Modells zu erreichen, wurden seitlich des Modells zwei weitere Platten als Endscheiben angebracht (siehe Bild 4.5). Diese Endscheiben wurden auf der unteren Platte befestigt. Sie wurden parallel zur Strömungsrichtung mit einem Abstand zum Modell von 1 mm angebracht. Die Höhe der seitlichen Platten wurde dem Abstand zwischen der oberen und der unteren Platten angepasst. Der Abstand zwischen den Platten H wurde genau wie bei den vorher beschriebenen Messungen am vollständigen Modell in 4 Stufen variiert ($H = 42$ mm, 62 mm, 84 mm, 104 mm). Die Geschwindigkeit V_∞ wurde von 10 m/s bis ungefähr 55 m/s in Schritten von jeweils 5 m/s variiert, um den Einfluss der Reynoldszahl auf den Querwiderstandsbeiwert zu untersuchen. Die Länge L_{SP} der Endscheiben beträgt 176 mm. Sie sind so angebracht, dass jeweils 33 mm der Länge vor und hinter dem Modell überstehen. Es wurden auch Messungen mit längeren Endscheiben durchgeführt, um den Einfluss der Plattenlänge auf die

Ergebnisse zu untersuchen (siehe Bild 4.10). Für die Messanordnung ist der Querwiderstand Y_Q gleich der gemessenen Kraft F_x .

4.1.2 Versuchsergebnisse, Vergleich mit berechneten Kraft- und Momentenbeiwerten

In den folgenden Diagrammen (Bild 4.6 und Bild 4.7) sind die Verläufe des Querkraftbeiwertes C_y und des Momentenbeiwertes C_n über dem Anströmwinkel bei verschiedenen Abständen zwischen den Platten dargestellt. Die Beiwerte stellen die Querkraft und das Giermoment in dimensionsloser Form dar und werden wie folgt definiert:

$$C_y = \frac{Y}{\frac{\rho_L V_\infty^2 A_L}{2}}, \quad C_n = \frac{N}{\frac{\rho_L V_\infty^2 A_L L}{2}} \quad (4.2)$$

mit ρ_L - Luftdichte.

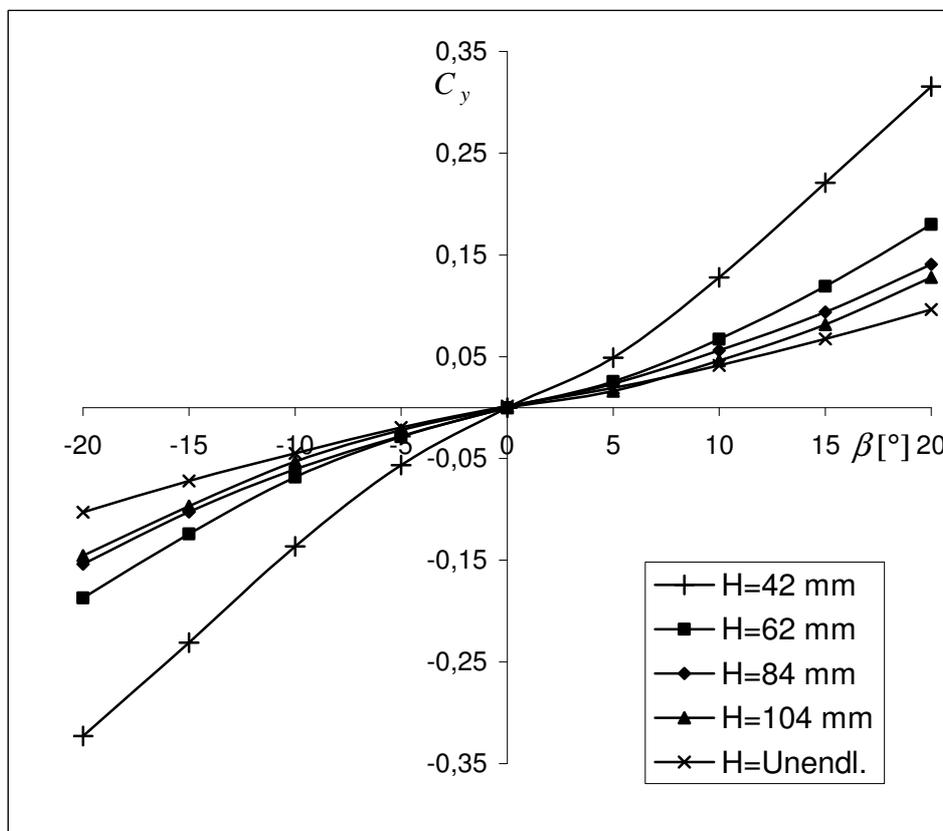


Bild 4.6 Querkraftbeiwert

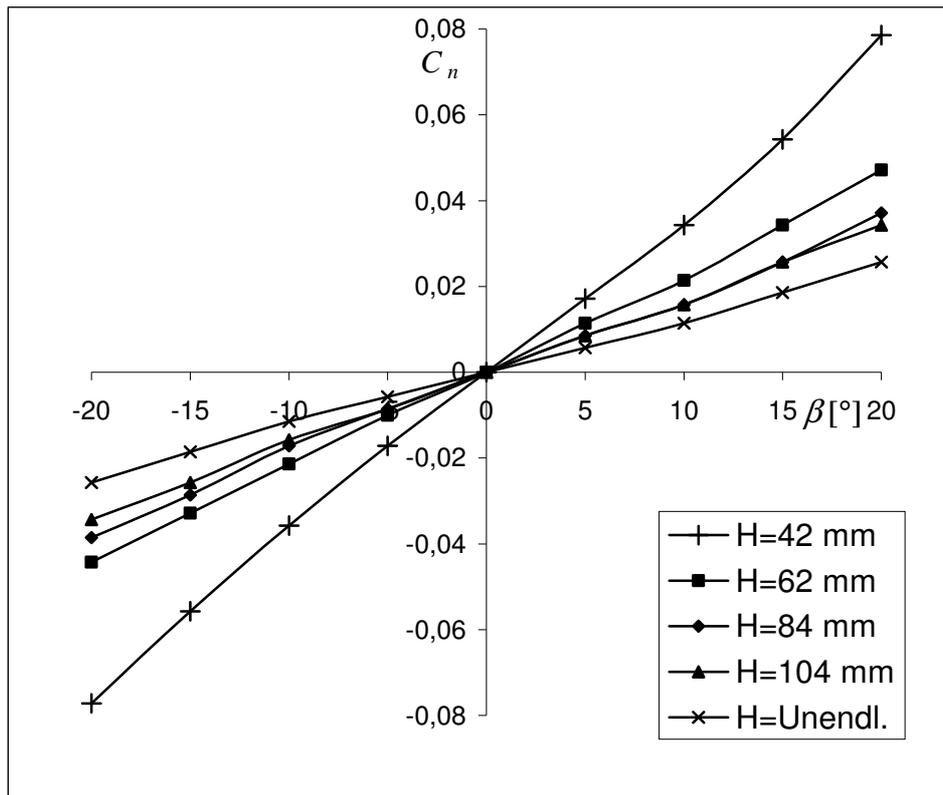


Bild 4.7 Momentenbeiwert

Aus den Diagrammen 4.6 und 4.7 ist eine nichtlineare Abhängigkeit der Beiwerte von dem Anströmwinkel zu erkennen. Die Beiwerte sind stark von dem Abstand zwischen den Platten bzw. Wassertiefe abhängig, wobei die Beiwerte bei extrem flachem Wasser ($H = 42 \text{ mm}$) mehrfach die Beiwerte bei tiefem Wasser überschreiten. Mit wachsender Wassertiefe nehmen die Kräfte und Momente rapide ab.

In den folgenden Diagrammen (Bild 4.8 und Bild 4.9) ist die Abhängigkeit des Querwiderstandsbeiwertes C_w von der Reynoldszahl und von dem Abstand zwischen den Platten dargestellt. Der Querwiderstandsbeiwert ist wie folgt definiert:

$$C_w = \frac{Y_Q}{\frac{\rho_L V_\infty^2 L_{MS} T}{2}}. \quad (4.3)$$

Die charakteristische Länge für die Berechnung der Reynoldszahl Rn ist die Modellbreite B .

$$Rn = \frac{V_{\infty} B}{\nu} \quad (4.4)$$

mit ν - dynamische Viskosität der Luft.

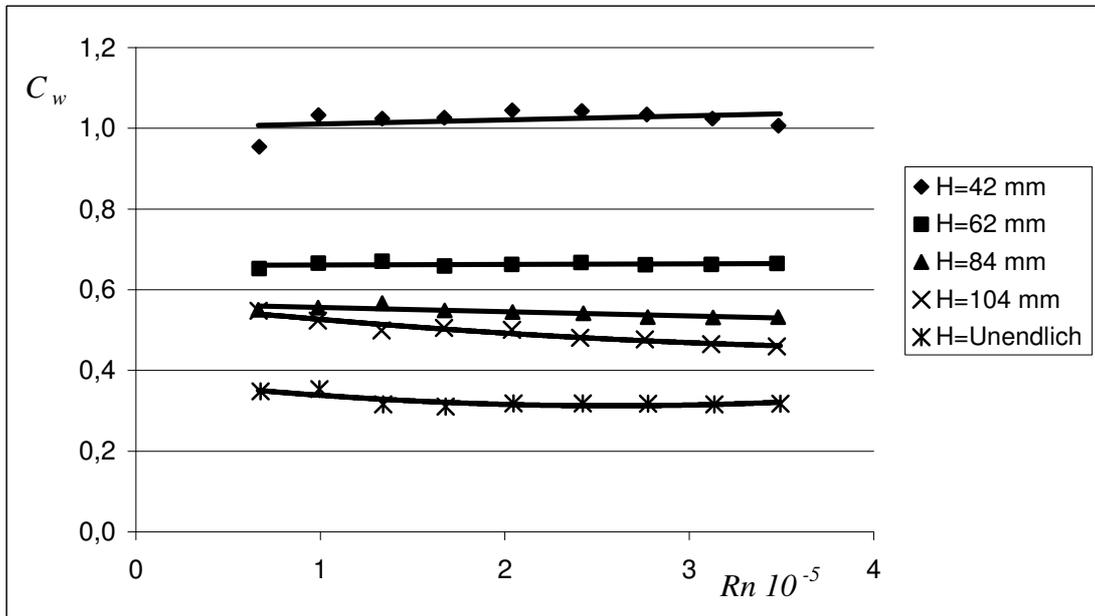


Bild 4.8 Querwiderstandsbeiwert in Abhängigkeit von der Reynoldszahl und von dem Abstand zwischen den Platten

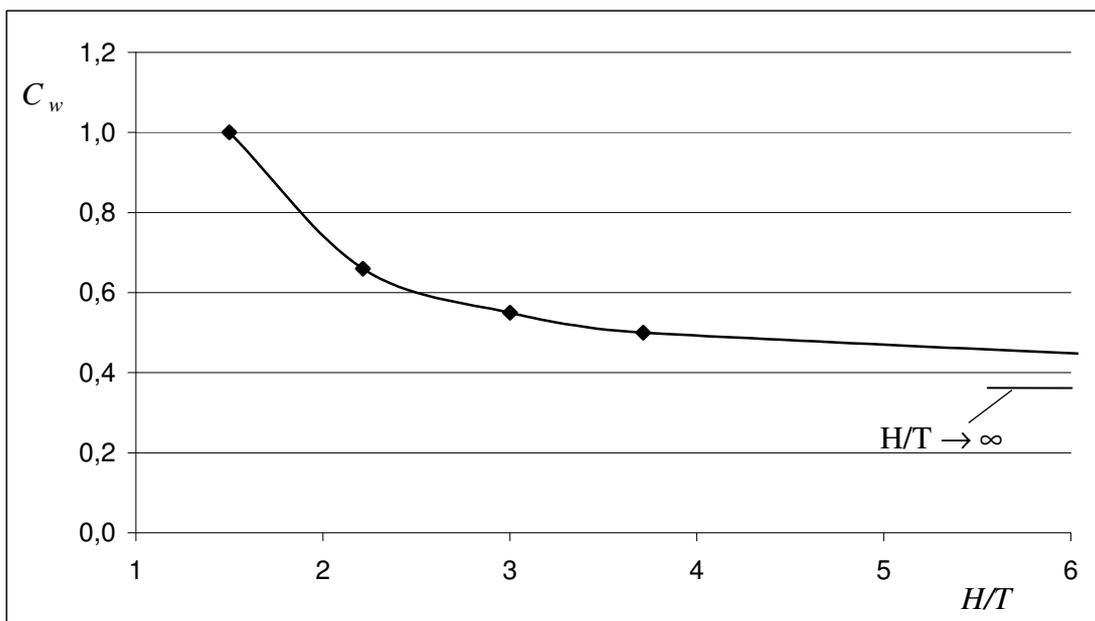


Bild 4.9 Querwiderstandsbeiwert in Abhängigkeit von H/T bei $Rn = 1 \cdot 10^5$

Eine Abhängigkeit des Querwiderstandsbeiwertes von der Reynoldszahl konnte nur bei größeren Wassertiefen bzw. Plattenabständen festgestellt werden (siehe Bild 4.8). Eine starke Abhängigkeit des Querwiderstandsbeiwertes von dem Plattenabstand wurde festgestellt (siehe Bild 4.8).

Um den Einfluss der Länge der Endscheiben auf die Messergebnisse zu untersuchen, wurden Messungen mit längeren Endscheiben ($L_{SP}=363$ mm) bei einem Abstand zwischen den horizontalen Platten von 42 mm durchgeführt. Die Endscheiben wurden so angebracht, dass 220 mm der Länge vor dem Modell liegen. Die Ergebnisse dieser Messungen sind im Bild 4.10 dargestellt. Die Abweichung der Messwerte beträgt 3% bis 5% und ist mit der unterschiedlichen Grenzschichtdicke an den Endscheiben am Ort des Modells zu erklären.

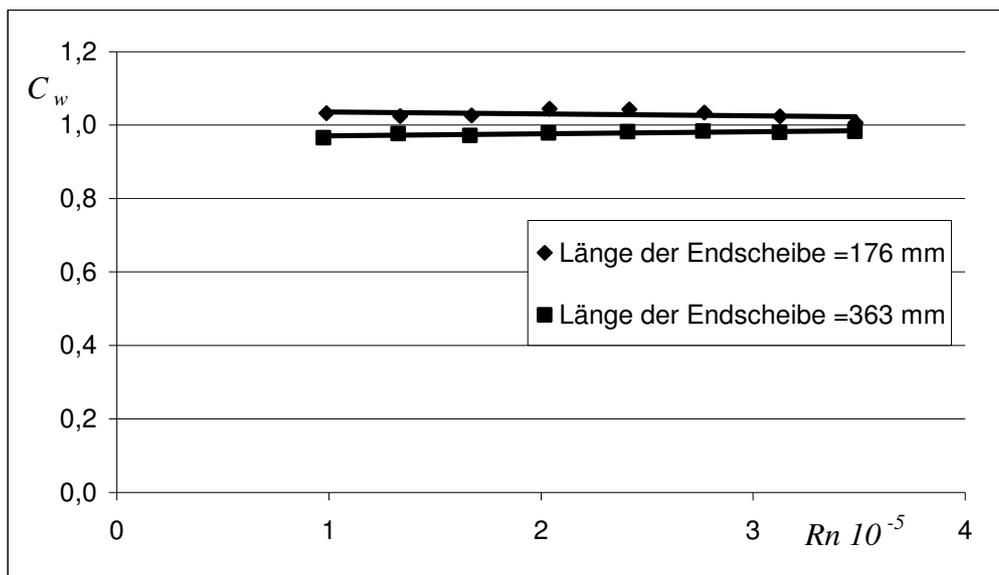


Bild 4.10 Einfluss der Länge der Seitenplatten auf die Messergebnisse bei $H=42$ mm

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird die Genauigkeit des Impulsverfahrens und des Querwiderstandskonzepts überprüft. Dafür wird ein Vergleich zwischen den gemessenen und den mithilfe der beiden theoretischen Ansätze (Impulsverfahren und Querwiderstandskonzept) berechneten Lasten vorgenommen.

In Kapitel 3 wurde bereits darauf hingewiesen, dass nach [Oltmann, Sharma, 1984] bzw. [Gronarz, 1997] die auf den Schiffskörper wirkenden Kräfte in Auftriebskräfte

aufgrund einer reinen Schräganströmung und Kräfte infolge der ebenen Querumströmung der einzelnen Schiffsquerschnitten unterteilt werden können. Die Auftriebskräfte sind nach [Puls, 1987] linear vom Anströmwinkel abhängig und können mithilfe des Impulsverfahrens [Schmitz, 1961] berechnet werden. Im Folgenden werden diese Kräfte lineare Kräfte genannt. Die Kraftwirkung der Queranströmung wird aus dem Querwiderstandsbeiwert in Abhängigkeit von x (Spantform) und der lokalen Querumströmung berechnet und ist in der Regel quadratisch von der Quergeschwindigkeit bzw. von dem Anströmwinkel abhängig. Aus diesem Grund werden die Kräfte infolge Querströmung weiterhin nichtlineare Kräfte genannt.

In den Bildern 4.11 und 4.12 sind die theoretischen und experimentell ermittelten Querkraft- bzw. Momentenbeiwerte gegenübergestellt, die bei einem Plattenabstand von 42 mm sowie ohne die obere Platte gewonnen wurden. Bei $H=42$ mm werden die Ergebnisse von einer Nachmessung abgebildet. Bei dieser Nachmessung wurde der Winkel β mit einem Schritt von $2,5^\circ$ variiert. Der lineare Anteil der Querkraft und das Moments wird in dimensionsloser Form unter „lineare Theorie“ dargestellt. Der nichtlineare Anteil der Kräfte wird in den Bildern nicht explizit dargestellt. Dieser wird als gesamter theoretischer Kraftbeiwert mit dem linearen Anteil zusammengefasst. Der Verlauf des gesamten theoretischen Kraftbeiwerts wird unter „Theorie“ in Bild 4.12 dargestellt.

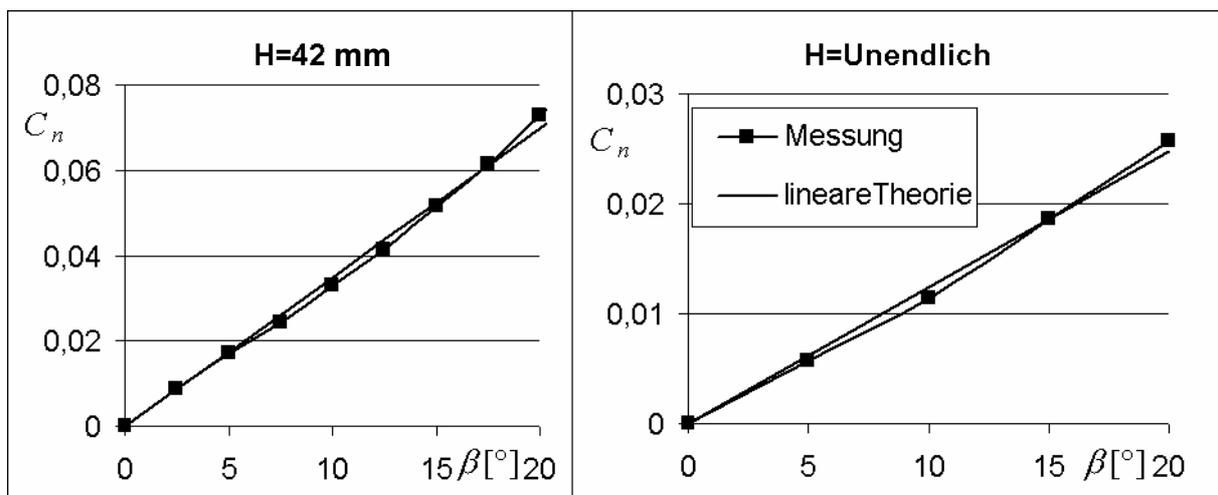


Bild 4.11 Vergleich von theoretischen und experimentellen Werten für den Momentenbeiwert

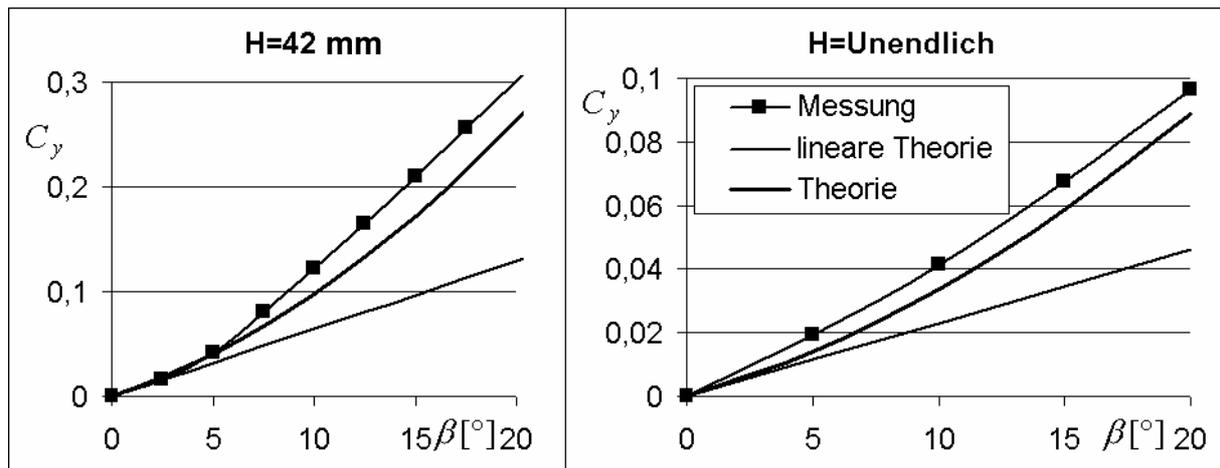


Bild 4.12 Vergleich von theoretischen und experimentellen Werten für den Querkraftbeiwert

Bei der Berechnung der nichtlinearen Kräfte wurde davon ausgegangen, dass sich durch die Schräganströmung des Modells im Windkanal eine näherungsweise konstante Queranströmung über die gesamte Modelllänge ergibt. Da das parallele Mittelschiff im betrachteten Fall ca. 70% der Gesamtlänge ausmacht, wurde auf die gesonderte Ermittlung des Querwiderstandsbeiwerts von Bug und Heck verzichtet. In der theoretischen Rechnung wurde der ermittelte Querwiderstandsbeiwert des parallelen Mittelschiffes auf die gesamte Länge angewandt. Eine konstante Verteilung der Queranströmungsgeschwindigkeit und des Querwiderstandsbeiwertes liefert bei Anwendung des Querwiderstandskonzepts eine konstante Verteilung des Querwiderstandes über die gesamte Schiffslänge. Daraus resultiert kein Moment bezüglich des Koordinatenursprungs, da dieser sich ungefähr in der Mitte des Schiffes befindet. Daher wird der theoretische Momentenbeiwert bei Schräganströmung ohne Drehung um die Hochachse bereits gut durch den linearen Anteil der Kräfte wiedergegeben, siehe Bild 4.11.

Im Bild 4.12 ist eine Abweichung zwischen der theoretisch berechneten und der experimentell ermittelten Querkraftbeiwert zu erkennen. Dabei ist der experimentell ermittelte Kraftbeiwert geringfügig größer als der berechnete.

Der Grund dafür kann in der Annahme einer konstanten Verteilung des Querwiderstandsbeiwerts und der Queranströmungsgeschwindigkeit im Bug- und Heckbereich des Schiffes liegen. Die Querwiderstandsbeiwertsverteilung über die Längsachse eines Containerschiffes bei tiefem Wasser ist in [Oltmann, Sharma,

1984] veröffentlicht. Demnach ist die Verteilung näherungsweise symmetrisch bezüglich des Koordinatenursprungs des schiffsfesten Koordinatensystems. Dabei ist eine Erhöhung des Beiwertes im Bug- und im Heckbereich des Schiffes zu beobachten. D.h. die Abweichungen der berechneten Strömungskräfte von den berechneten können auf die vereinfachenden Annahmen zur Umströmung der Heck- und Bugbereich zurückgeführt werden.

Zusammenfassend lässt der Vergleich zwischen den theoretisch und experimentell bestimmten Momentenbeiwerten (Bild 4.11) darauf schließen, dass das Giermoment für den untersuchten Winkelbereich mittels Impulsverfahren ausreichend genau bestimmt werden kann. Die Übereinstimmung von Theorie und Modellexperiment im Fall der Querkraftbeiwert ist befriedigend, wenn der Querwiderstand berücksichtigt wird. Eine weitere Verbesserung der Übereinstimmung ist möglicherweise gegeben, wenn die dreidimensionale Umströmung von Bug- und Heck genauer berücksichtigt wird.

4.2 Modellversuche in der Längsschlepprinne

Ziel der durchgeführten Untersuchungen war die experimentelle Ermittlung der Bewegungsgrößen eines freifahrenden Modells in einem unregelmäßigen Strömungsfeld. Einschlägige Modellexperimente sind aus der in- und ausländischen Literatur bisher nicht bekannt, somit musste Neuland betreten werden. Es wurde ein Konzept erdacht, entwickelt und umgesetzt, das an die Bedingungen des Schlepptanks der Universität Rostock angepasst ist.

Die wesentlichen Merkmale des Versuchsstandes und der Versuchsdurchführung sind folgende:

- Ein Doppelboden zur Modellierung der endlichen Wassertiefe montiert in dem Schlepptank
- Eine auf dem Doppelboden befestigte Einrichtung zur Erzeugung einer definierten seitlichen Strömung
- Eine über dem Doppelboden angehängte Videokamera zur Aufnahme des Bewegungsverlaufes des Schiffmodells

Gemessen wurde der Bewegungsverlauf des Modells, nachdem es sich frei bewegen konnte und den Bereich des Doppelbodens erreichte. Die den Bewegungsverlauf beschreibenden Größen sind die Lage des Modellsschwerpunkts in einem vordefinierten Koordinatensystem (siehe nächsten Abschnitt), der Kurswinkel, der Gierwinkel, die Bahnkrümmung und die Modellgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Messzeit. Die Bewegungsverläufe werden mithilfe der Videokamera aufgenommen. Die gesuchten Messdaten werden durch Videoanalyse der Bewegungsaufnahmen gewonnen (siehe Abschnitt 4.2.2).

4.2.1 Messkonzept

Der jeweils realisierte Versuchsverlauf kann wie folgt beschrieben werden: Das Modell wurde mithilfe des Schleppwagens in der Schlepprinne auf für die Untersuchungen gewünschte Freifahrtgeschwindigkeit V_0 gebracht. Kurz vor dem Erreichen des Doppelbodens wird das Modell freigelassen. Das Wasser im Tank befindet sich in diesem Bereich in Ruhe. Das Modell bewegt sich zunächst gleichförmig auf gerader Bahn. Nach einer freien Wegstrecke von etwa 2 Metern durchfährt das Modell einen Bereich mit seitlicher Querströmung mit der Strömungsgeschwindigkeit $V_s(x_0, y_0)$. Diese bewirkt eine Kursänderung auf Grund des örtlich und zeitlich veränderlichen Anstellwinkels. Die Bewegung des frei fahrenden Modells wird von oben mithilfe einer Videokamera gefilmt.

Die Analyse des Bewegungsverhaltens erfolgt berührungslos mittels digitaler Bildanalyse. Grundlage hierfür ist ein kommerzielles Bildbearbeitungsprogramm der Firma HaSoTec GmbH [<http://www.hasotec.com/>].

Das eingesetzte Schiffsmodell weist den Rumpf von MS-Main im Maßstab 1:100 auf. Nachgebildet wurden die Bewegungen des Schiffes bei einer Wassertiefe von 4 m. Deswegen wurde der Doppelboden 40 mm unter dem Wasserspiegel angebracht.

Da für die genaue Bestimmung der Lage des Schiffes im raumfesten Koordinatensystem neben der Lage des Modellschwerpunktes auch der Kurswinkel

gebraucht wird, werden bei der Videoanalyse die Koordinaten von mindestens zwei Punkten auf dem Modell benötigt. Auf dem Schiffsmodell wurden als Kontrollpunkte zwei Leuchtdioden befestigt. Die Videoanalyse liefert die Koordinaten dieser Leuchtdioden bei bestimmten Zeitpunkten. Anhand dieser Koordinaten werden die gesuchten Größen (Lage des Modellsschwerpunkts, Kurswinkel, Gierwinkel, Bahnkrümmung und Modellgeschwindigkeit) berechnet. Das benutzte Videoanalyzesystem sowie die Berechnung der die Bewegung beschreibenden Größen werden im Abschnitt „Auswertung der Rohdaten“ (Abschnitt 4.2.2) vorgestellt.

4.2.1.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsstand wird in den nachfolgenden Bildern dargestellt. Alle Abmessungen in den Bildern sind in Millimeter angegeben. Der Ursprung des raumfesten Koordinatensystems liegt in der Mitte der Vorderkante des Doppelbodens. Das Strömungsfeld wird mithilfe einer Wasserpumpe erzeugt. Die Pumpe fördert Wasser in einen hinter einem Wehr gebauten Tank. Wenn der Wasserspiegel die Oberkante des Tanks erreicht (die Oberkante des Tanks befindet sich oberhalb des Wasserspiegels der Rinne), fließt das Wasser über eine geneigte Platte. Erreicht das Wasser aus dem Tank den Doppelboden, wird es durch diesen umgeleitet. Das umgeleitete Wasser strömt durch eine vor dem Wehr eingebaute Düse und erzeugt dann vor dem mittleren Drittel des Wehres die seitliche Strömung. Die Düse wurde durch 2 Platten realisiert (siehe Bilder 4.13, 4.15 und 4.18). Durch die Düse sollte einerseits die Realisierung einer Strömung ermöglicht werden, die eine für die Versuche ausgewählte Geschwindigkeit erreichen sollte. Andererseits sollte die Einrichtung keinen Einfluss auf die Modellbewegungen haben. Die optimale Form der Platten hat sich durch Vorversuche ergeben.

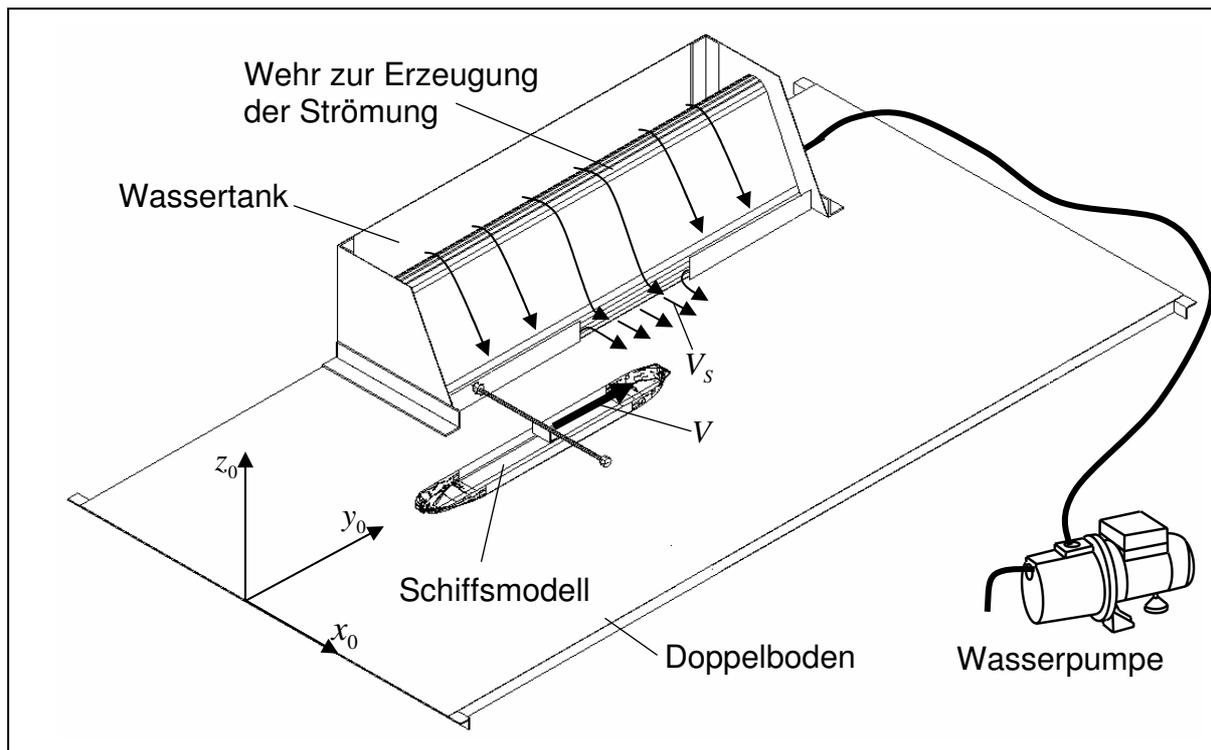


Bild 4.13 Versuchsaufbau und Koordinatensystem

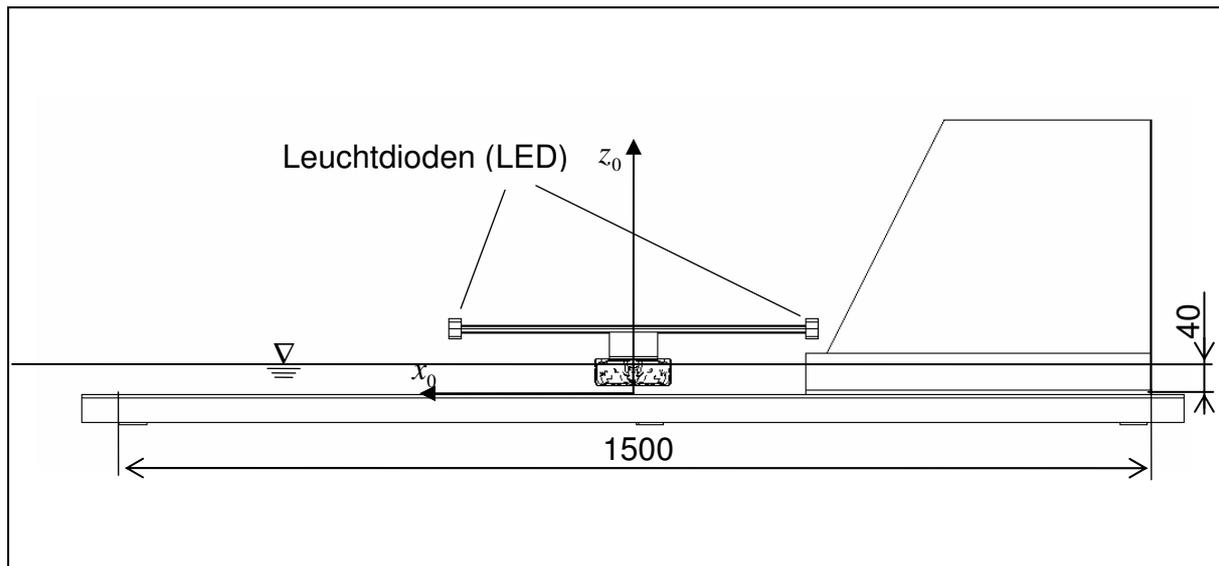


Bild 4.14 Versuchsaufbau. Ansicht von vorne

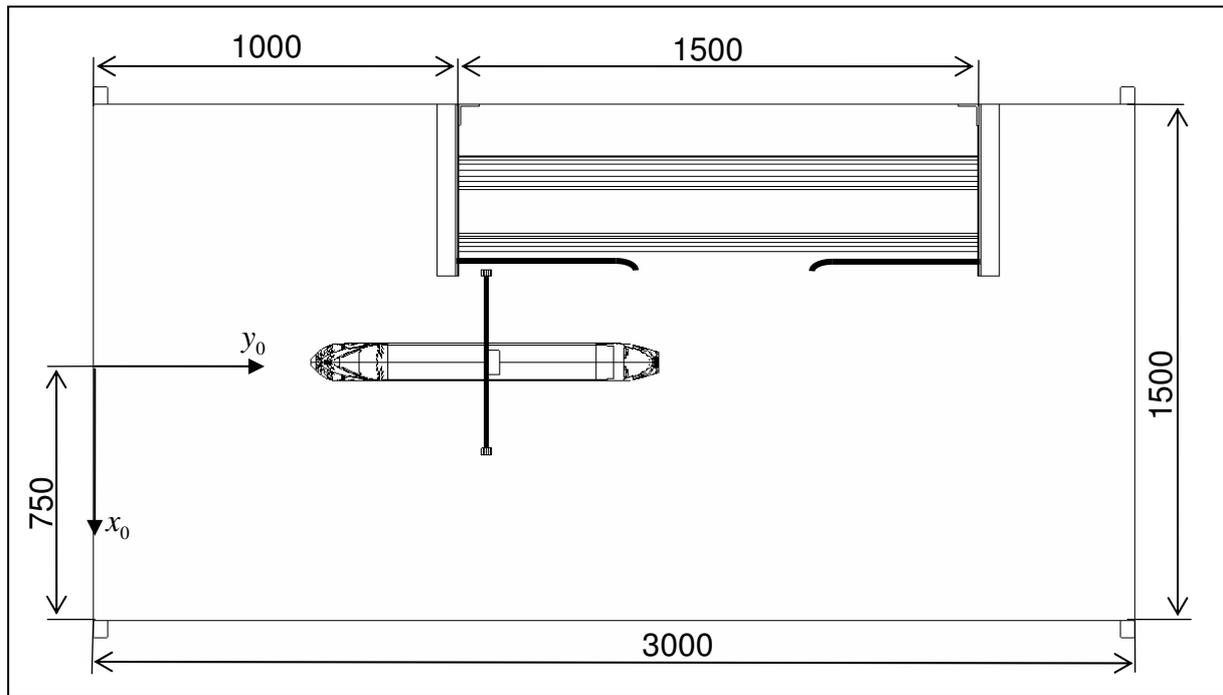


Bild 4.15 Versuchsaufbau. Ansicht von oben

Die Videokamera wurde zentral 3,5 Meter über dem Doppelboden befestigt und mit einem Weitwinkelobjektiv ausgerüstet. Die Befestigungshöhe der Kamera hat sich durch die Höhe der Decke der Schlepprinne ergeben. Durch das Weitwinkelobjektiv wurde das Videobild verzerrt. Diese Tatsache wurde bei der Auswertung der Ergebnisse berücksichtigt. Die Vorgehensweise wird im Abschnitt 4.2.2 erläutert.

An dem Schleppwagen wurde eine Einrichtung angebracht, die die Befestigung des Schiffes in der Anfahrphase ermöglicht. Durch die Einrichtung sollte eine gleichförmige Bewegung in der Anfangsphase der Bewegung realisieren werden. Das Modell soll sich am Anfang geradeaus und ohne Gierwinkel bewegen. Um das zu realisieren, wurde das Modell an zwei Stellen angeschoben (siehe Bild 4.16). Die Anschubpunkte wurden in gleichem Abstand von der Modellmitte links und rechts von dem Modell in einer horizontalen Ebene festgelegt. Durch Verschiebung dieser Anschubpunkte in der horizontalen Ebene konnte der Anfangsgierwinkel eingestellt werden.

4.2.1.2 Schiffmodell

Das Schiffmodell besitzt die folgenden Charakteristika:

Masse (mit den Aufbauten)	$m =$	2,86 kg
Länge	$L =$	1000 mm
Breite	$B =$	110 mm
Seitenhöhe	$D =$	35 mm
Tiefgang (bei $m = 2,86$ kg)	$T =$	28 mm
Trägheitsmoment	$I_z =$	0,1655 kg·m ²

Das Modell wurde aus Kunstholz (Dichte $\rho_{Holz} = 0,7$ kg/dm³) gefräst.

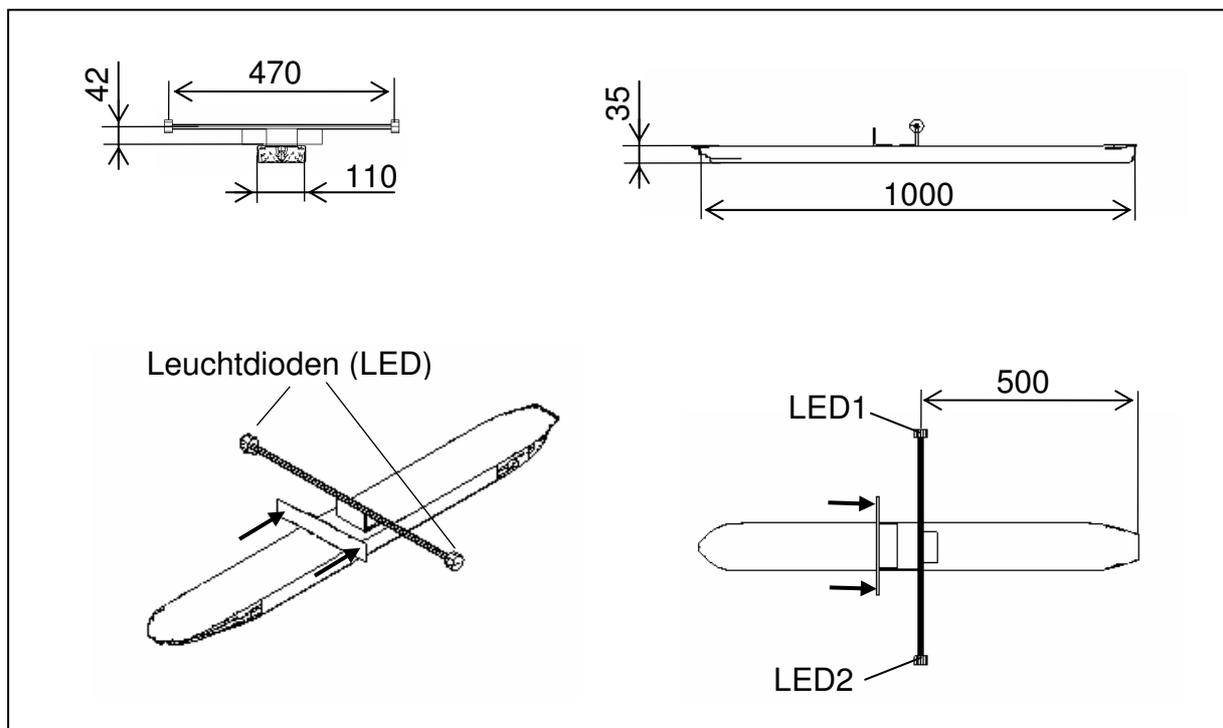


Bild 4.16 Schiffmodell mit Abmessungen (in [mm])

An dem Modell wurde ein Aluminiumwinkel befestigt, an dessen beiden Enden das Modell durch den Schleppwagen angeschoben werden kann, so dass eine Geradeausfahrt des Modells beim Beschleunigen garantiert ist. Auf einem weiteren Aluminiumwinkelprofil wurde ein Stab montiert, an dessen beiden Enden jeweils eine Leuchtdiode (LED) angebracht wurde. Beide Dioden wurden in gleichem Abstand von der Modellmitte angebracht.



Bild 4.17 Schiffsmodell mit Aufbauten

Da bereits kleine Anfangskrängungs- und Anfangstrimmwinkel den Ablauf der Bewegung merklich beeinflussen [Puls, 1977], wurde das Modell mithilfe von verschiebbaren Gewichten im Ruhezustand auf ebenen Kiel getrimmt.

Erste Untersuchungen mit der Anlage, die der Reproduzierbarkeit galten, haben ergeben, dass infolge Vibrationen des Schleppwagens während des Anschlebens Störungen auf das Modell übertragen wurden. Um diese zu minimieren, wurden an den beiden Punkten, an denen das Modell angeschoben wurde, jeweils einen Kunststoffelement als Dämpfer angebracht.

4.2.1.3 Messparameter

Die Versuche wurden im Süßwasser ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$) durchgeführt. Eine seitliche Strömung wurde im Bereich zwischen $y_0 = 1500 \text{ mm}$ bis $y_0 = 2000 \text{ mm}$ gemäß Bild 4.18 erzeugt. Die Stromgeschwindigkeitskomponente in x_0 -Richtung ist in Bild 4.18

dargestellt. Die dargestellten Strömungsverteilungen sind auf Grundlage von Messungen mit einem Prandtlrohr gewonnen worden. Das Diagramm im Bild 4.18 stellt die Strömungsgeschwindigkeit in einer Ebene, die 20 mm über den Doppelboden liegt, dar. Die im Bild 4.18 angegebene Geschwindigkeitsverteilung stellt zeitlich gemittelte Werte dar, die mit dem Prandtlrohr über einen Zeitabschnitt von 120 Sekunden gemessen wurden.

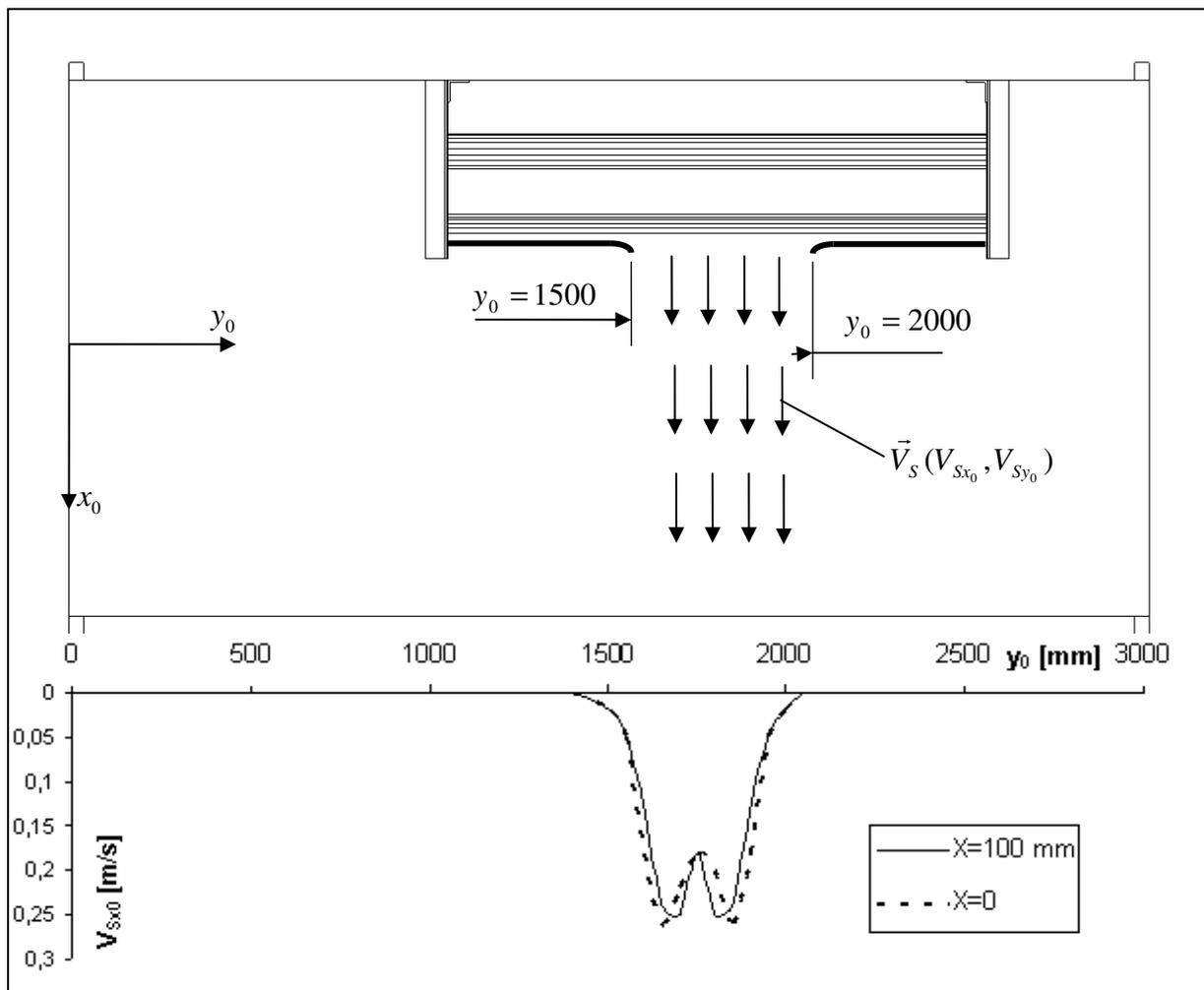


Bild 4.18 Strömungsverhältnisse im Messbereich

Unter Berücksichtigung der Froudezahl entspricht die im Modellversuch realisierte maximale Strömungsgeschwindigkeit von 0,25 m/s einer Geschwindigkeit von 2,5 m/s bei der Großausführung. So eine Strömungsgeschwindigkeit ist nicht selten in real existierenden Flussabschnitten zu beobachten (siehe Bild 5.4). Die Reynoldszahl, die bei den Modellversuchen realisiert wurde, ist viel niedriger als bei

der Großausführung. Diese ist jedoch von derselben Größenordnung, die im Windkanal realisiert wurde.

4.2.2 Auswertung der Rohdaten

Die Rohdaten, die nach der Durchführung der Versuche in Form von Videosequenzen vorliegen, werden mithilfe des Videoanalysesystems „VideoMot2“ von HaSoTec GmbH ausgewertet.

Das System erhält als Input (Eingangsdaten) ein Videosignal von einer Videokamera oder einem Videorecorder. Das Videosignal wird in Graustufen umgewandelt (Bild 4.19). Von dem zu analysierenden Bild werden alle Teile, deren Farbe unter einer bestimmten Graustufe liegen, ausgeschnitten, d.h., sie erscheinen auf dem Bildschirm schwarz. Die restlichen Felder werden von dem System als weiß betrachtet (Bild 4.20).

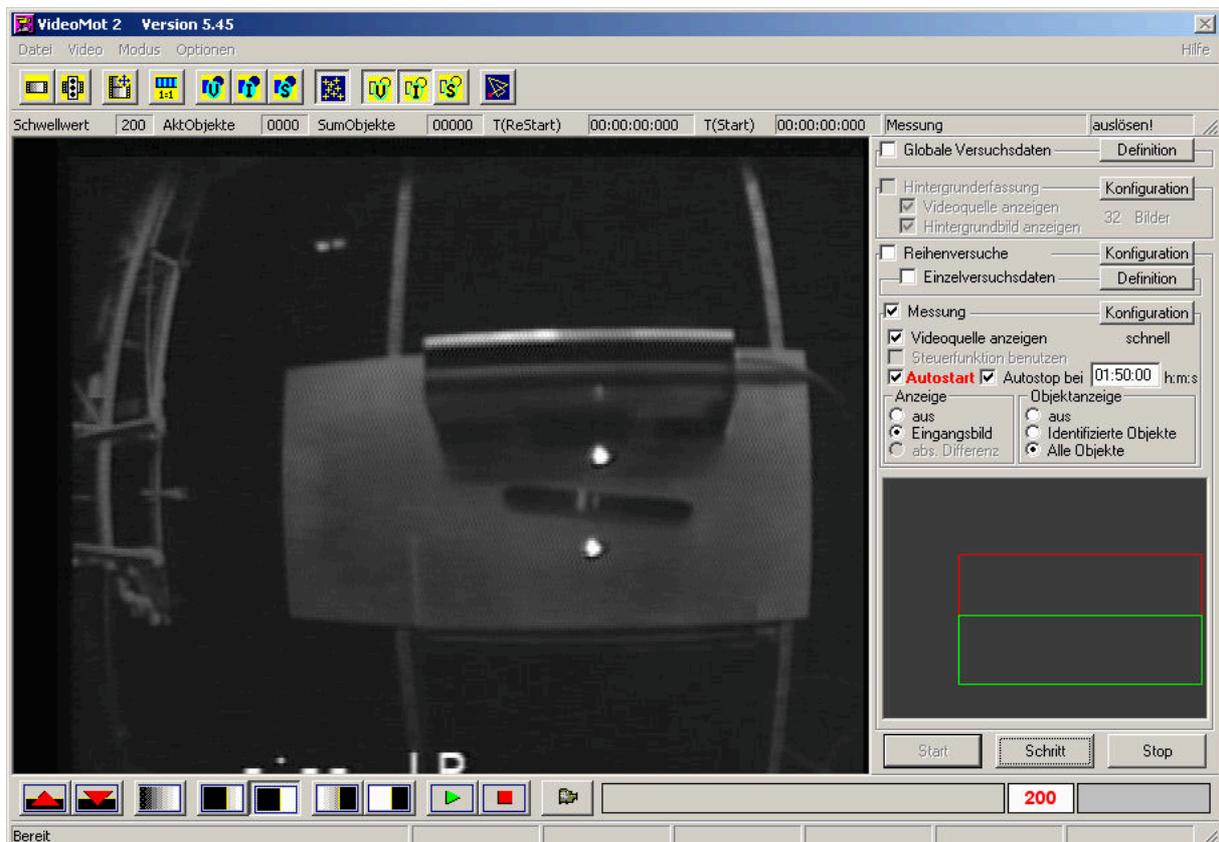


Bild 4.19 Eingangsvideobild mit den beiden hellen Bildpunkten

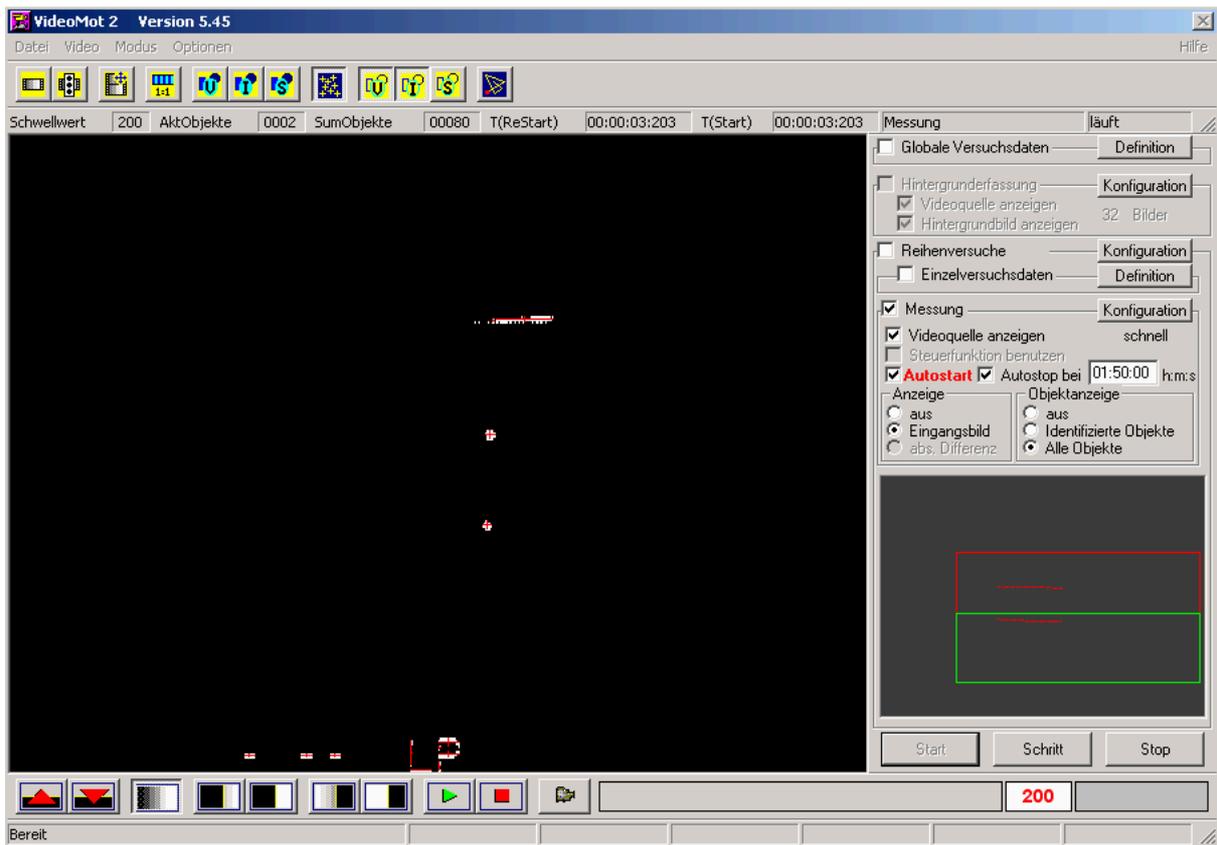


Bild 4.20 Schwarz-Weiß-Videobild nach der Graustufenanalyse für die digitale Bildauswertung

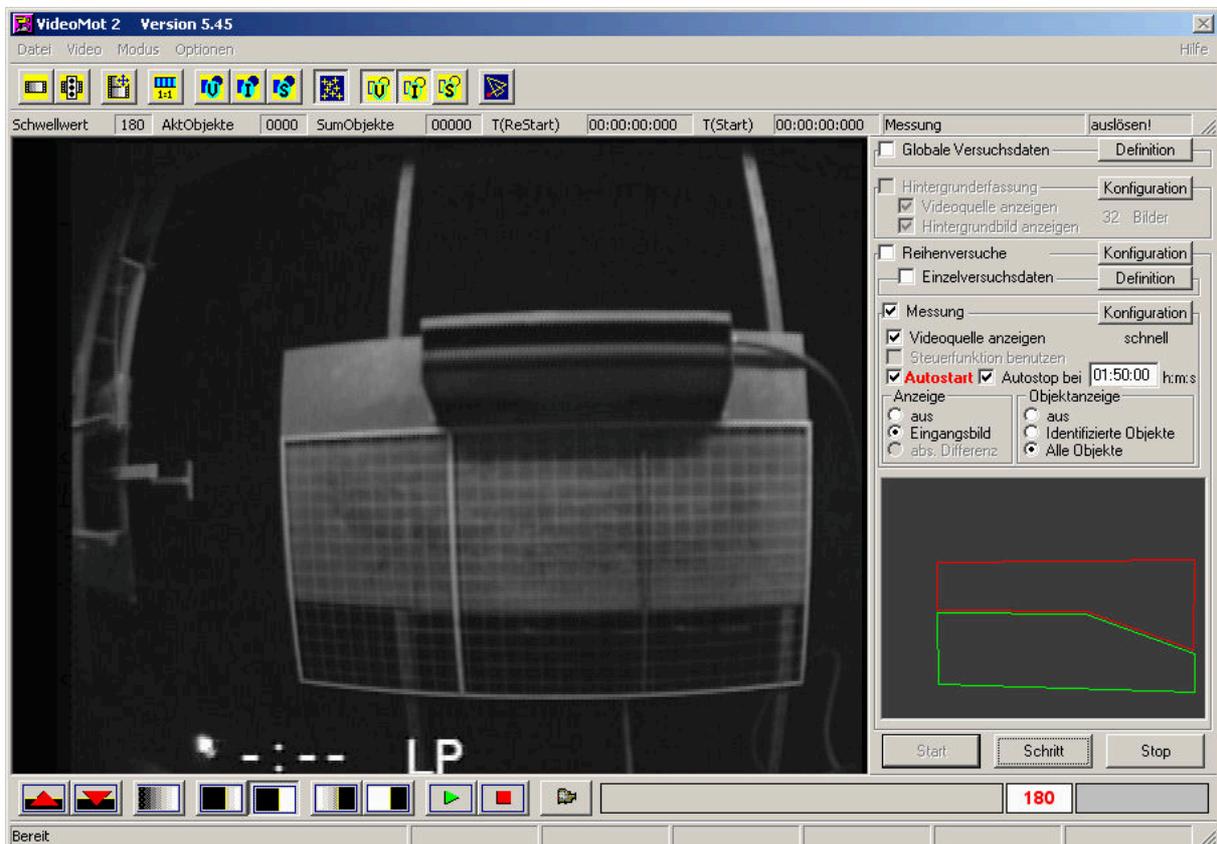


Bild 4.21 Raster

Das System liefert dann die Schwerpunktkoordinaten der weißen Bildfeldern in Pixel sowie den Zeitpunkt t_i , bei dem sie aufgenommen wurden.

Das System bearbeitet Bilder in einer Größe von 640x480 Pixel. Es wurde für die Versuche so eingestellt, dass nur die hellsten Bildabschnitte, hervorgerufen durch die mitgeführten LED's, bei der Auswertung als weiß erscheinen.

Nach der Analyse werden die Koordinaten $x_i^{LED1}(t_i)$ und $y_i^{LED1}(t_i)$ von LED 1 (siehe Bild 4.16) und $x_i^{LED2}(t_i)$ und $y_i^{LED2}(t_i)$ von LED 2 in Pixel geliefert. Die gelieferten Koordinaten gelten für das durch das Weitwinkelobjektiv verzerrte Eingangsbild (Bild 4.19). Für die weiteren Untersuchungen wurden diese Koordinaten mithilfe der Fehlerquadratmethode entzerrt. Für diesen Zweck wurde auf dem Doppelboden ein Raster gelegt und in der gleichen Kameraposition gefilmt (Bild 4.21). Die äußeren Rasterabmessungen sind 1,5 mal 3 Meter. Der Abstand zwischen den Rasterlinien beträgt 10 cm. Das Raster wurde auf dem Doppelboden so angebracht, dass die obere linke Ecke (siehe Bild 4.21) die Koordinaten $x_0 = -25$ cm und $y_0 = 0$ und die obere rechte $x_0 = -25$ cm und $y_0 = 300$ cm in dem raumfesten Koordinatensystem (Bild 4.13) haben. Die Pixelkoordinaten der Rasterschnittpunkte wurden mit einem kommerziellen Bildbearbeitungsprogramm aus Bild 4.21 entnommen.

Die Entzerrung wird folgendermaßen durchgeführt: Gegeben sind die verzerrten Pixelkoordinaten $(x_i^p, y_i^p, i = 1 \dots n_{Rp})$ der Rasterschnittpunkte für eine Punktemenge von n_{Rp} Punkten sowie die nicht verzerrten (realen) Koordinaten derselben Punkte in [m] $(x_i^m, y_i^m, i = 1 \dots n_{Rp})$. Anhand dieser Koordinaten werden mithilfe der Fehlerquadratmethode Umrechnungspolynome ermittelt, die zur Umrechnung von verzerrten Pixelkoordinaten (x^p, y^p) in entzerrte Koordinaten in Meter (x, y) in dem raumfesten Koordinatensystem dienen. Die eingesetzten Umrechnungsformeln besitzen die folgende Form:

$$\begin{aligned} x[m] &= a_0 + a_1 x^p + a_2 y^p + a_3 (x^p)^2 + a_4 (y^p)^2 + a_5 x^p y^p + a_6 x^p (y^p)^2 + a_7 (x^p)^2 y^p \\ y[m] &= b_0 + b_1 x^p + b_2 y^p + b_3 (x^p)^2 + b_4 (y^p)^2 + b_5 x^p y^p + b_6 x^p (y^p)^2 + b_7 (x^p)^2 y^p \end{aligned} \quad (4.4)$$

Die Koeffizienten a_0, \dots, a_7 bzw. b_0, \dots, b_7 werden nach der Fehlerquadratmethode durch die Lösung des folgenden Gleichungssystems ermittelt.

$$G^T G \underline{a} = G^T \underline{y} \quad (4.5)$$

mit

$$G = \begin{pmatrix} 1 & x_1^P & y_1^P & (x_1^P)^2 & (y_1^P)^2 & x_1^P y_1^P & x_1^P (y_1^P)^2 & (x_1^P)^2 y_1^P \\ 1 & x_2^P & y_2^P & (x_2^P)^2 & (y_2^P)^2 & x_2^P y_2^P & x_2^P (y_2^P)^2 & (x_2^P)^2 y_2^P \\ \vdots & \vdots \\ 1 & x_{n_{Rp}}^P & y_{n_{Rp}}^P & (x_{n_{Rp}}^P)^2 & (y_{n_{Rp}}^P)^2 & x_{n_{Rp}}^P y_{n_{Rp}}^P & x_{n_{Rp}}^P (y_{n_{Rp}}^P)^2 & (x_{n_{Rp}}^P)^2 y_{n_{Rp}}^P \end{pmatrix},$$

$$\underline{a} = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_7 \end{pmatrix} \text{ bzw. } \underline{a} = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_7 \end{pmatrix}, \quad \underline{y} = \begin{pmatrix} x_1^m \\ x_2^m \\ \vdots \\ x_{n_{Rp}}^m \end{pmatrix} \text{ bzw. } \underline{y} = \begin{pmatrix} y_1^m \\ y_2^m \\ \vdots \\ y_{n_{Rp}}^m \end{pmatrix}. \quad (4.6)$$

Nachdem die Pixelkoordinaten der LED's mithilfe der Umrechnungsformeln (4.4) entzerrt und in Meter umgerechnet werden, können die Koordinaten des Schiffsschwerpunktes (x_i, y_i) wie folgt berechnet werden

$$x_i = x_i^{LED2} + \frac{x_i^{LED1} - x_i^{LED2}}{2},$$

$$y_i = y_i^{LED2} + \frac{y_i^{LED1} - y_i^{LED2}}{2}. \quad (4.7)$$

Der Kurswinkel ψ in [rad] wird wie folgt berechnet

$$\psi_i = \frac{\pi}{2} + \arctan\left(\frac{y_i^{LED1} - y_i^{LED2}}{x_i^{LED1} - x_i^{LED2}}\right). \quad (4.8)$$

Der von dem Modell für einen Zeitschritt Δt gefahrene Weg Δs_i ist

$$\Delta s_i = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}. \quad (4.9)$$

Unter der Annahme, dass sich das Modell während des Zeitschrittes Δt ohne Beschleunigung bewegt hat, kann seine momentane Geschwindigkeit wie folgt berechnet werden

$$V_i = \frac{\Delta s_i}{t_i - t_{i-1}}. \quad (4.10)$$

Der Gierwinkel wird wie folgt berechnet

$$\beta_i = \psi_i - \arctan\left(\frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}\right). \quad (4.11)$$

Die Winkelgeschwindigkeit ω_i ist gleich der zeitlichen Änderung des Kurswinkels

$$\omega_i = \frac{\psi_i - \psi_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}. \quad (4.12)$$

Die Bahnkrümmung Ω ist dann

$$\Omega_i = \frac{L}{V_i} \omega_i. \quad (4.13)$$

Das Eingangsbild für das Bildauswertungssystem umfasst ein Gebiet von ca. 4,7 mal 3,5 Meter. Das Eingangsbild hat eine Größe von 640 mal 480 Pixel. Das System liefert Pixelkoordinaten mit der Genauigkeit von 1 Pixel. Das entspricht einer Genauigkeit von ungefähr 7,3 mm.

Um die infolge Bildverzerrung auftretenden Abweichungen zu berechnen, wurden die verzerrten Pixelkoordinaten der Rasterkontrollpunkte in Formel (4.4) eingesetzt. Die so berechneten entzerrten Koordinaten wurden mit den tatsächlichen Koordinaten der Kontrollpunkte verglichen. Aus diesem Vergleich ergab sich eine durchschnittliche Abweichung von 1,3 cm.

Da alle untersuchten Größen von der Genauigkeit der gelieferten Koordinaten der LED's abhängig sind, wurde eine Genauigkeitsstudie durchgeführt. Dabei wurden die Rohdaten für einen ausgewählten Versuch exemplarisch ausgewertet:

Bei einer ersten Auswertung wurden die vom System gelieferten Pixelkoordinaten unverändert in Formel (4.4) übernommen. Anhand der berechneten Koordinaten wurden die Bewegungsgrößen berechnet. Bei einer zweiten Auswertung wurde ein halber Pixel zu den vom System gelieferten Koordinaten addiert und anhand der korrigierten Koordinaten wurden die Bewegungsgrößen neu berechnet. Bei der dritten Auswertung wurde ein halber Pixel subtrahiert. Anhand der Ergebnisse der 3 Auswertungsvorgänge wurde die Abweichung berechnet. Die maximale Abweichung bei dem Gierwinkel beträgt 0,0042 rad, bei der Bahnkrümmung 0,018[-], bei dem Kurswinkel 0,0042 rad und bei der Geschwindigkeit 0,2 cm/s.

4.2.3 Messergebnisse

In den folgenden Bildern und Diagrammen sind die Ergebnisse von zwei Versuchsreihen dargestellt. Bei der Durchführung der Versuche aus der ersten Reihe wurde das Modell bis zur Anfangsgeschwindigkeit $V_0 = 0,7$ m/s beschleunigt, bei der zweiten bis $V_0 = 0,8$ m/s. Während der Fahrt in der Messstrecke verringerte sich die Modellgeschwindigkeit von 0,56 m/s am Anfang der Strecke auf 0,35 m/s am Ende der Strecke (siehe Bilder 4.24 bzw. 4.26). Unter Berücksichtigung der Froudezahl entspricht das einer Geschwindigkeit von ungefähr 5,6 und 3,5 m/s bei der Großausführung. Dies sind übliche Geschwindigkeiten von Binnenschiffen in den Binnenwasserstraßen.

In den Bildern 4.22 und 4.25 sind die gemessenen Modellbahnen dargestellt. Sie zeigen die Lage des Modellschwerpunkts in dem raumfesten Koordinatensystem. Auf den gemessenen Bahnen sind Schiffssymbole gezeichnet, die die genaue Lage des Schiffes zu bestimmten Zeitpunkten repräsentieren.

In den Diagrammen (Bild 4.23, 4.24, 4.26, 4.27) sind die zeitlichen Verläufe der gemessenen Bewegungsgrößen (Gierwinkel, Bahnkrümmung, Kurswinkel und Modellgeschwindigkeit) über die dimensionslose Zeit τ (siehe Formel 2.10)

dargestellt. Gezeigt sind die Verläufe von dem Zeitpunkt, in dem das Modell komplett über dem Doppelboden ist (d.h. $y_0 = 50$ cm) bis zum Zeitpunkt, in dem der Bug des Modells den Doppelbodenbereich verlässt ($y_0 = 250$ cm). Die Strecke, die das Modell über dem Doppelboden fährt, entspricht ungefähr 2 Modelllängen.

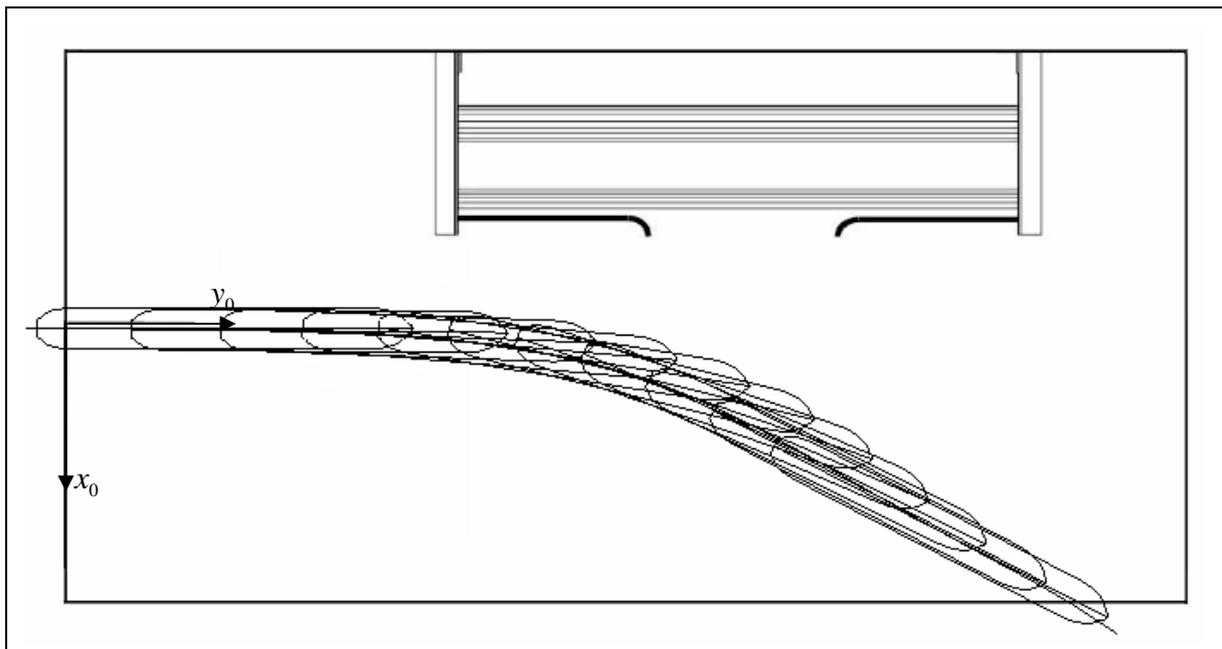


Bild 4.22 Gemessene Modellbahn bei $V_0 = 0,7$ m/s

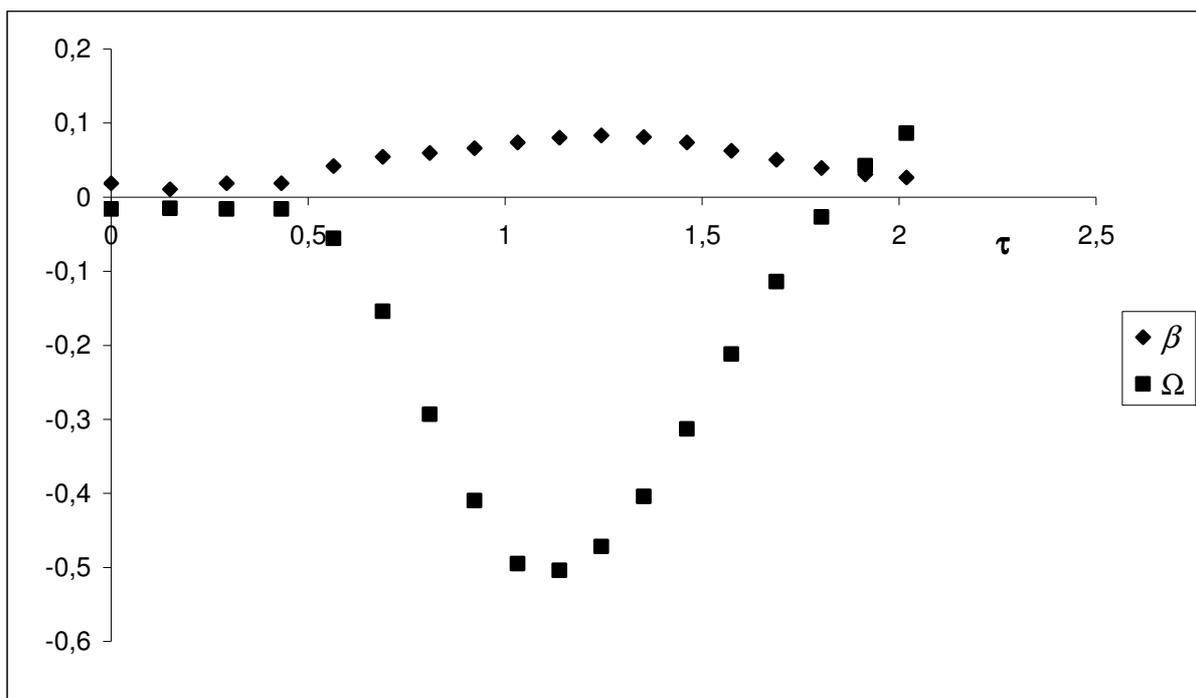


Bild 4.23 Gemessene Gierwinkel und Bahnkrümmung bei $V_0 = 0,7$ m/s

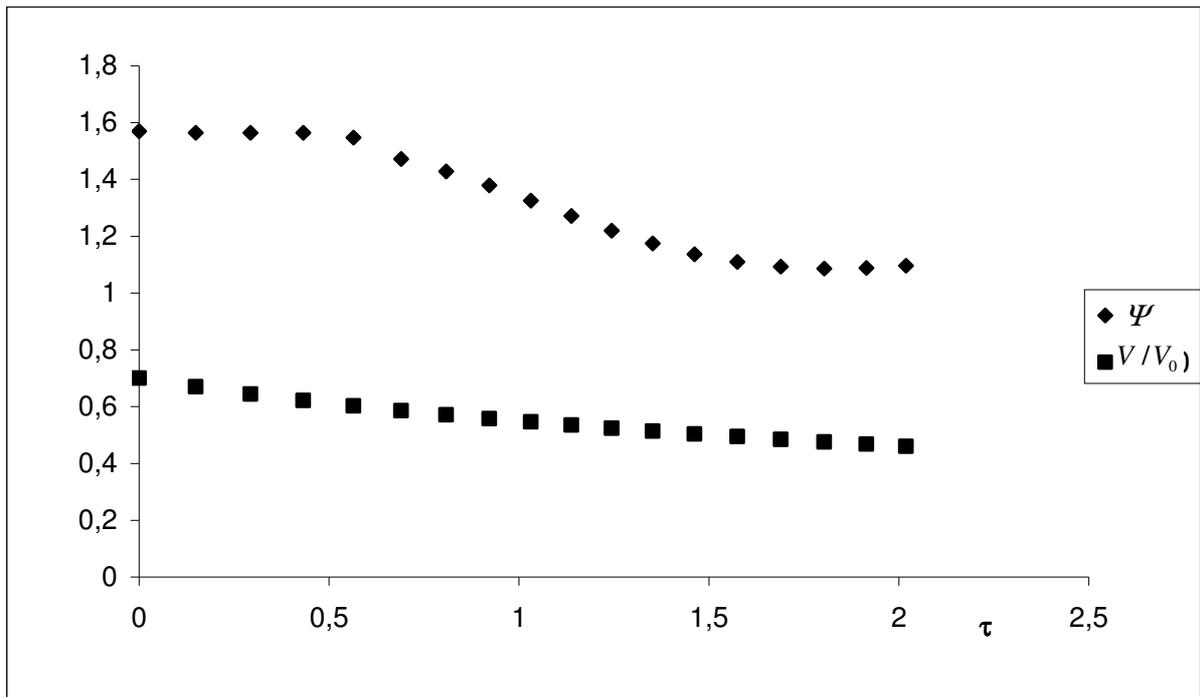


Bild 4.24 Gemessene Kurswinkel und Modellgeschwindigkeit bei $V_0 = 0,7$ m/s

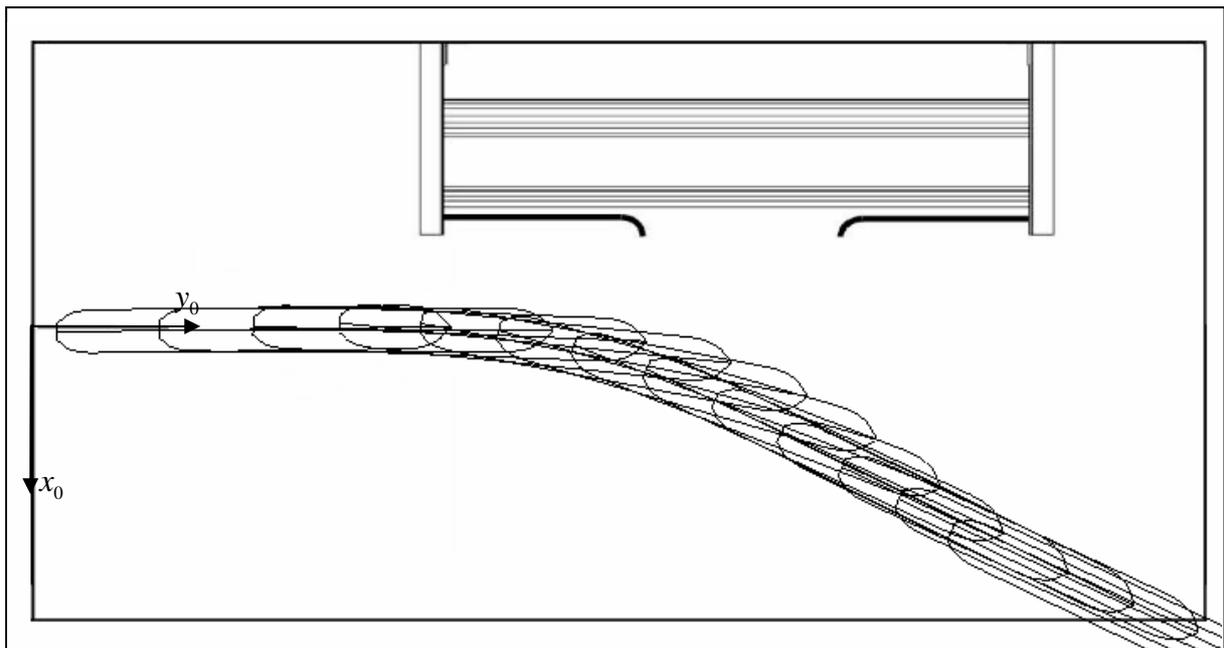


Bild 4.25 Gemessene Modellbahn bei $V_0 = 0,8$ m/s

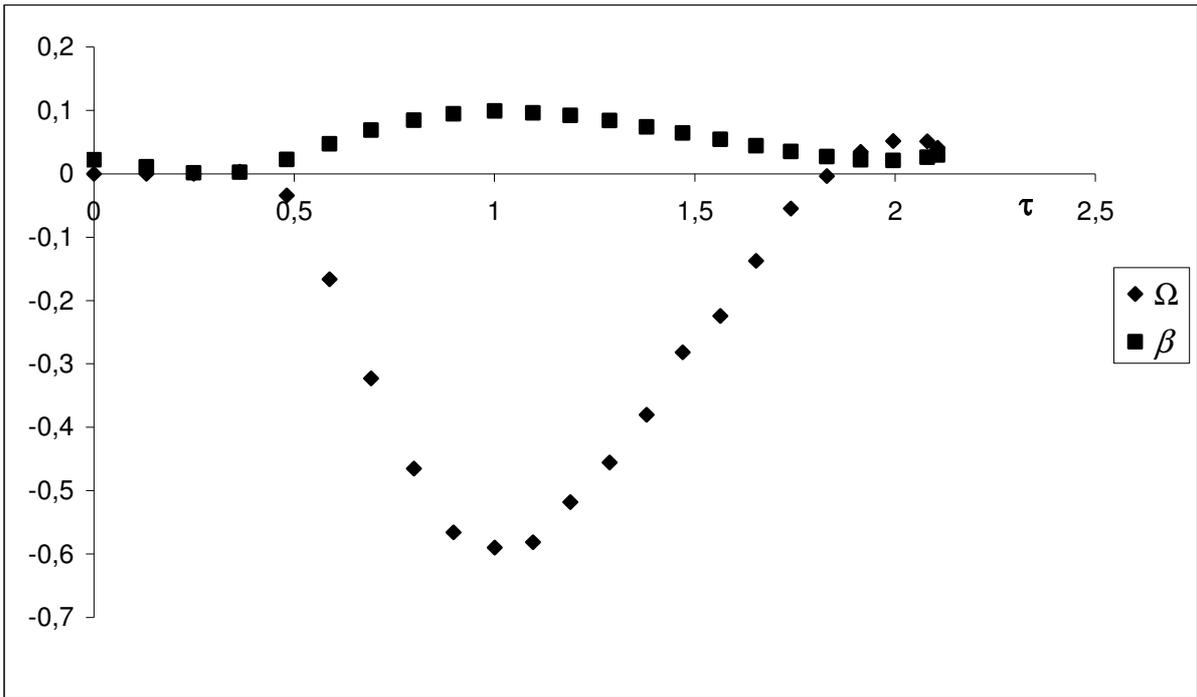


Bild 4.26 Gemessene Gierwinkel und Bahnkrümmung bei $V_0 = 0,8$ m/s

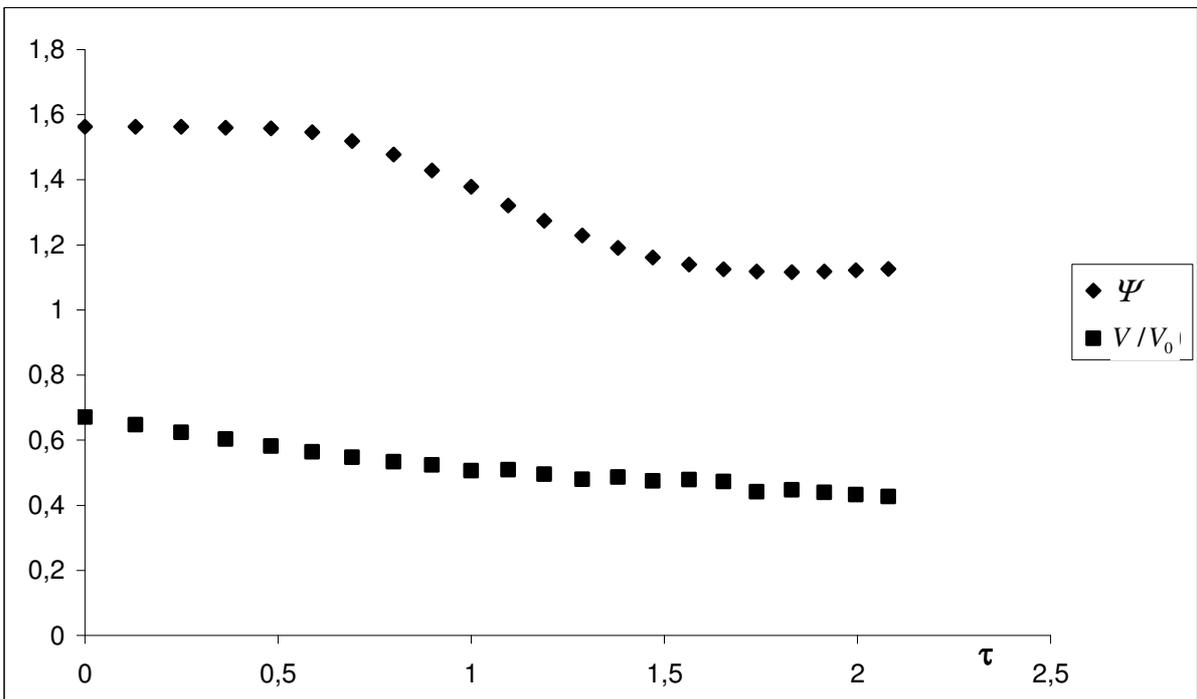


Bild 4.27 Gemessene Kurswinkel und Modellgeschwindigkeit bei $V_0 = 0,8$ m/s

Da das Schiffsmodell, noch bevor es den Doppelboden erreicht, freigelassen wird, ist die Geschwindigkeit V des Modells bei $\tau = 0$ (d.h. $y_0 = 50$ cm) kleiner als die Anfangsgeschwindigkeit V_0 . Aufgrund des Widerstands wird das Modell über die

gesamte Messtrecke abgebremst. Das führt zu der gemessenen Geschwindigkeitsabnahme.

Es ist den Bildern und den Diagrammen deutlich zu entnehmen, dass das Schiffsmodell durch die Strömung von der geraden Bahn umgelenkt wird. Der Grad dieser Umlenkung ist bei dem langsameren Modell in geringerem Maße größer. Das resultiert aus dem größeren örtlichen Anstellwinkel (siehe Gleichung 3.25). Es ist den Diagrammen ebenfalls zu entnehmen, dass das Modell sich zu drehen beginnt noch bevor sein Bug das Gebiet erreicht, in dem die Gewässerströmung generiert wurde. Der Bug erreicht dieses Gebiet bei $\tau = 0,5$ bzw. $y_0 = 100$ cm. Gierwinkel und Bahnkrümmung erreichen ihr Maximum jeweils bei $\tau \approx 1$, wenn das komplette Vorschiff sich in der äußeren Strömung befindet. Das Heck verlässt das Strömungsgebiet bei ungefähr $\tau \approx 2$ ($y_0 = 200$ cm). Nach dem Verlassen des Strömungsgebietes fährt das Modell wieder auf gerader Bahn.

Die experimentell ermittelten Bewegungsgrößen und -verläufe werden im folgenden Kapitel mit Ergebnissen verglichen, die durch Bewegungssimulationen gewonnen werden.

5 Bewegungssimulationen

Das Ziel der Bewegungssimulationen ist es, den Bewegungsverlauf eines Schiffes für einen bestimmten Zeitabschnitt vorausszusagen. Dabei werden die Ruder- und Propellerkräfte als bekannt vorausgesetzt. Der zeitabhängige Verlauf der Geschwindigkeit $V(t)$, des Gierwinkels $\beta(t)$ und der Bahnkrümmung $\Omega(t)$ über einen Zeitabschnitt folgt aus der numerischen Lösung der Bewegungsgleichungen (3.42). Um die Lage des Schiffes zu jedem Zeitpunkt eindeutig zu beschreiben, werden die Lage des Schiffsschwerpunkts $x_0(t), y_0(t)$ und der Kurswinkel $\psi(t)$ benötigt. Diese werden anhand der berechneten Gierwinkel, Bahnkrümmung und Schiffsgeschwindigkeit wie folgt berechnet.

$$x_0(t) = x_0(t=0) + \int_t V(t) \cos(\psi(t) - \beta(t)) dt, \quad (5.1)$$

$$y_0(t) = y_0(t=0) + \int_t V(t) \sin(\psi(t) - \beta(t)) dt$$

mit

$$\psi(t) = \psi(t=0) + \int_t \omega(t) dt. \quad (5.2)$$

Die Bewegungsgleichungen werden mit dem Runge-Kutta-Verfahren [Faires, Burden, 1994] gelöst. Da dieses ein Integrationsverfahren 4-ter Ordnung ist, verringert sich der Integrationsfehler mit der vierten Potenz der Integrationszeitschrittweite.

Auf der Grundlage des im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten mathematischen Modells wurde ein Computerprogramm zur Simulation von Schiffsbewegungen im Fließgewässer entwickelt. Das gesamte Programmpaket beinhaltet Module, die die Berechnung der hydrodynamischen Massenverteilung sowie der Koeffizienten der linearen Lasten in den Bewegungsgleichungen bei Vorgabe der Schiffsform unter Berücksichtigung der Wassertiefe ermöglichen. Ein weiteres Modul (Bild 5.1) simuliert Schiffsbewegungen in einer räumlich verteilten über die Wassertiefe

gemittelten Gewässerströmung. In diesem Modul ist zusätzlich ein Regler in das numerische Modell implementiert. Dieser Regler ermöglicht die virtuelle Steuerung eines Schiffes auf einem vorgegebenen Kurs. Die Funktionsweise des Reglers ist von [Sandler, 2005] beschrieben worden. Mithilfe dieses Moduls kann der Platzbedarf für eine bestimmte Route berechnet werden, indem das Schiff mithilfe des Reglers virtuell auf dieser Route gesteuert wird. Der Verlauf der Route ergibt sich aus den Gegebenheiten der Wasserstrasse.

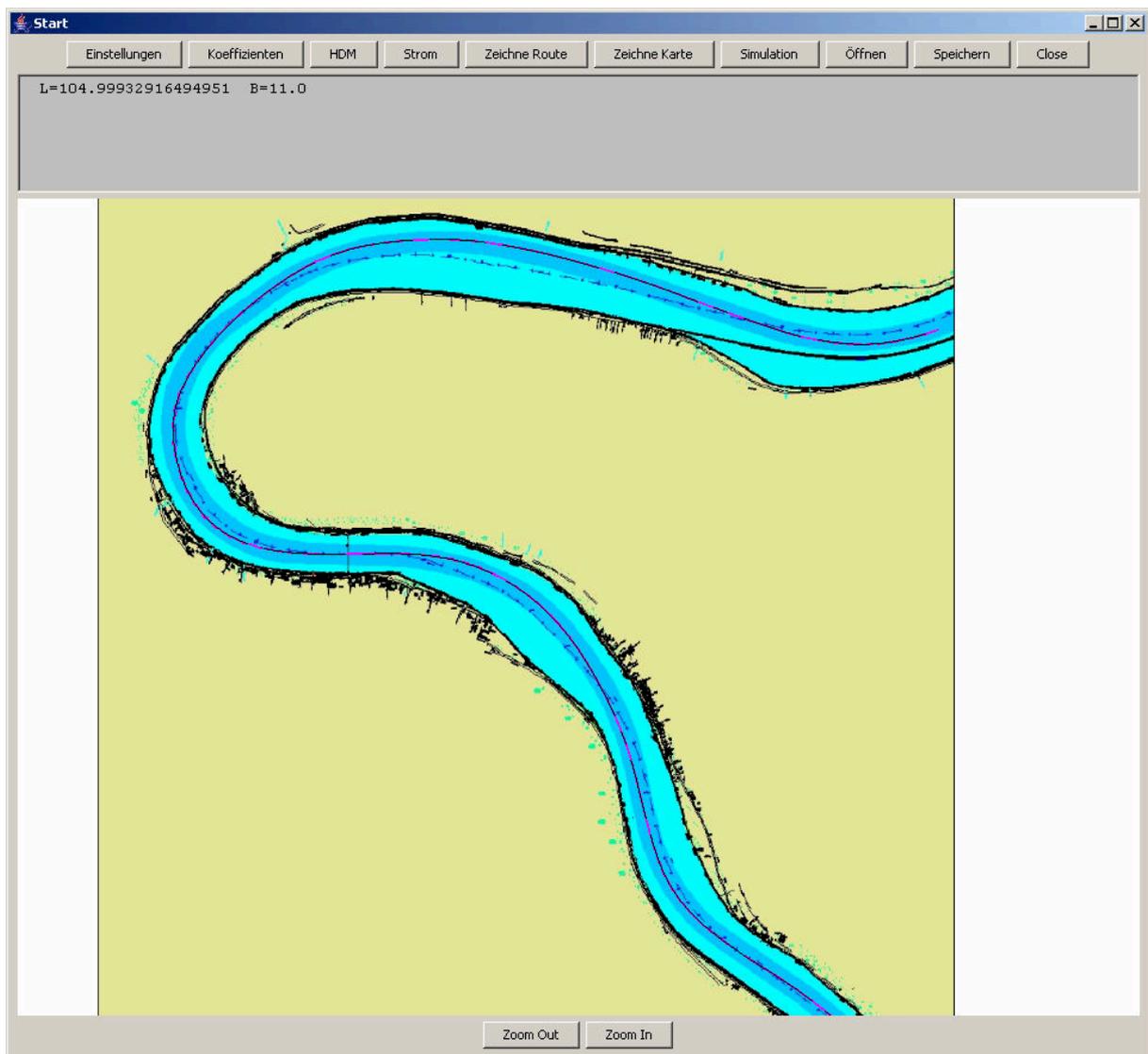


Bild 5.1 Hauptfenster des Computerprogramms

Im Bild 5.1 ist das Hauptfenster des Programms abgebildet. In dem Programmfenster ist die Karte eines Reinabschnitts südlich von Koblenz dargestellt. Die dunkelblaue Streife in der Mitte des Flusses bezeichnet das Fahrwasser. Es ist eindeutig zu

sehen, dass nicht die gesamte Breite einer Wasserstraße für die Schifffahrt zur Verfügung steht. In dem Bild ist weiterhin eine Schiffsspur dargestellt. Diese wurde durch eine Bewegungssimulation generiert. Dabei wurden die Strömungsverhältnisse in diesem Abschnitt anhand einer von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) zur Verfügung gestellten Strömungsbeschreibungdatei berücksichtigt. Als vorgegeben galt eine Route, die von MS Main im Rahmen einer experimentalen Fahrt gefahren wurde. Die Route wurde ebenfalls durch die BAW zur Verfügung gestellt.

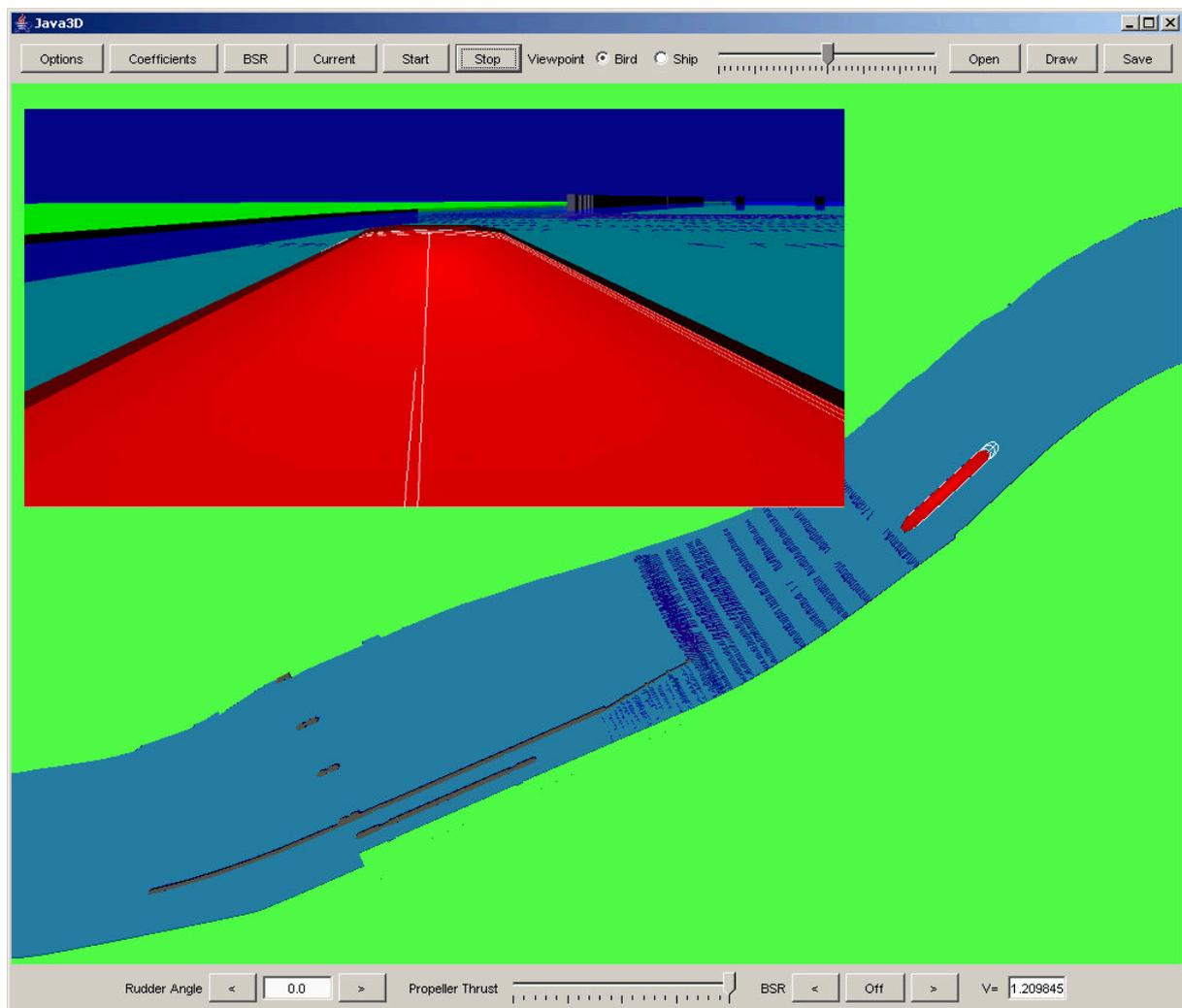


Bild 5.2 Hauptfenster des Echtzeitsimulators

Das mathematische Modell benötigt einen vergleichsweise geringeren Rechenaufwand für die Durchführung von Bewegungssimulationen. Dies ermöglicht den Einsatz des Modells für Echtzeitsimulationen. Ein weiteres Modul des auf Grundlage des mathematischen Modells entwickelten Computerprogramms nutzt

diese Möglichkeit (Bild 5.2). Im Bild 5.2 ist das Hauptfenster eines Echtzeitsimulators dargestellt. In diesem Bild ist eine Schleuse in der Nähe von Heidelberg abgebildet.

Mithilfe der entwickelten Software wurden die Modellversuche in der Schlepprinne simuliert. Ergebnisse dieser Simulationsrechnung werden im Abschnitt 5.1 vorgestellt und mit den Ergebnissen aus den Modellversuchen verglichen. Weiterhin wurden Simulationen für einen real existierenden Rheinabschnitt durchgeführt. Anhand der Simulationsergebnisse wird im Abschnitt 5.2 der Einfluss der Gewässerströmung auf die Schiffsbewegungen diskutiert. Die Einsetzbarkeit des mathematischen Modells unter realen Bedingungen wurde mithilfe von Naturversuchen mit der MS Main auf dem Rhein überprüft. Die Naturversuche und ein Vergleich zwischen Simulations- und Messergebnissen werden im Abschnitt 5.2 dargestellt.

5.1 Nachrechnung der Modellmessfahrt

Für die Nachrechnung der gemessenen Modellbahnen wurden die Polynome nach Gleichung (3.42) benutzt. Da das Modell weder Ruder noch Propeller besitzt, werden die Koeffizienten, die ihre Kraftwirkung nachbilden, zu Null gesetzt. Als Anfangsbedingung wurde die Geschwindigkeit des Modells bei $\tau = 0$ gemäß Bild 4.27 definiert. Der Anfangsgierwinkel und die Anfangsbahnkrümmung wurden zu Null gesetzt. Die Anfangskoordinaten bezüglich des raumfesten Koordinatensystem (Bild 4.13) wurden zu $x_0 = 0$ und $y_0 = 50$ cm gesetzt. Ausgehend davon, dass der Modellwiderstand quadratisch von der Modellgeschwindigkeit abhängig ist, wurde er durch Auswertung der Messergebnisse für die Modellgeschwindigkeit aus den Bildern 4.25 und 4.28 iterativ bestimmt, d.h. der Faktor, der die Abhängigkeit des Widerstandes von der Geschwindigkeit ausdrückt, wurde so oft geändert bis der Geschwindigkeitsabfall bei der Modellsimulation die selbe Form hatte wie in den Bildern 4.25 und 4.28. Für die Berechnung der Massenkoeffizienten und der linearen Kräfte wurde eine Massenverteilung eingesetzt, die mithilfe des Panelverfahrens berechnet wurde. Die nichtlinearen Kräfte wurden mithilfe des im Windkanal gemessenen Widerstandsbeiwertes des Mittelschiffes unter der Annahme berechnet, dass der Beiwert konstant über die Schiffslänge ist.

Im Bild 5.3 ist der Verlauf des Lewisschen Trägheitskoeffizienten $C(x)$ über die Schiffslänge für das Schiffsmodell bei einem Tiefgang von 28 mm und einer Wassertiefe von 40 mm dargestellt. Der Lewissche Trägheitskoeffizient $C(x)$ ist das Verhältnis der hydrodynamischen Masse eines an der Wasseroberfläche gespiegelten Spantes $\bar{m}_y^{DS}(x)$ zu der hydrodynamischen Masse eines Kreises mit Durchmesser $2T$. Die hydrodynamische Masse eines Kreises ist gleich der von ihm verdrängten Flüssigkeitsmasse $\rho\pi T^2$.

$$C(x) = \frac{\bar{m}_y^{DS}(x)}{\rho\pi T^2} \quad (5.3)$$

Die hydrodynamische Masse des Modellspantes entspricht der Hälfte der hydrodynamischen Masse des Doppelspantes. Für die Simulationen wurde eine hydrodynamische Massenverteilung eingesetzt, die anhand des Diagramms im Bild 5.3 berechnet wurde.

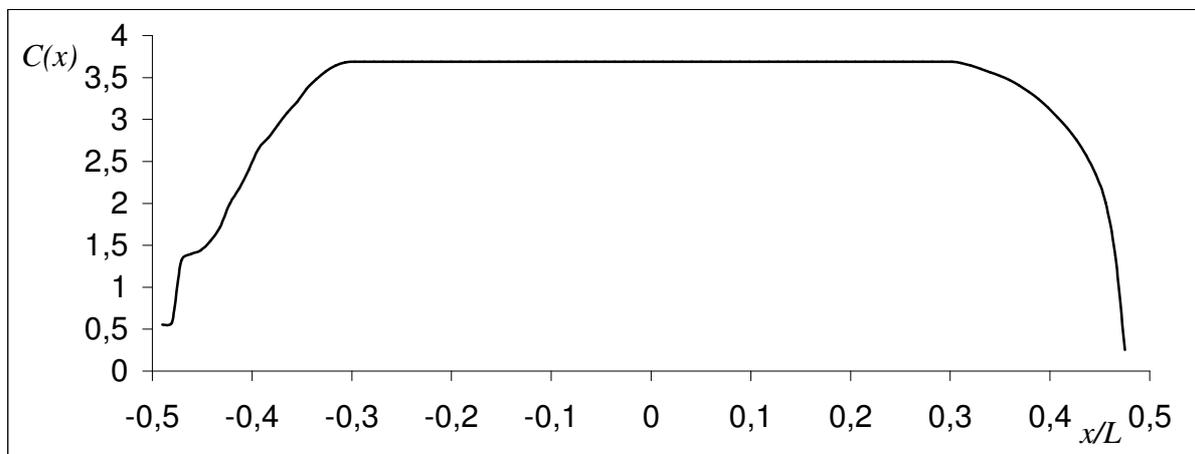


Bild 5.3 Hydrodynamische Massenverteilung des Schiffsmodells bei $T = 28$ mm und $H = 40$ mm

Das Bild 5.4 zeigt die simulierten (blau) und gemessenen (schwarz) Modellbahnen. Die eindeutige Lage des Modells für ausgewählte Zeitpunkte wird mithilfe von Schiffssymbolen dargestellt. Dem Bild ist eine gute Übereinstimmung zwischen den berechneten und gemessenen Modellbahnen zu entnehmen.

Im Bild 5.5 werden die gemessenen und berechneten Verläufe von Gierwinkel und Bahnkrümmung darstellt. Dabei ist auch eine charakteristische Übereinstimmung

deutlich. Die quantitative Abweichung ist auf die Ungenauigkeit der getroffenen Annahmen zurückzuführen.

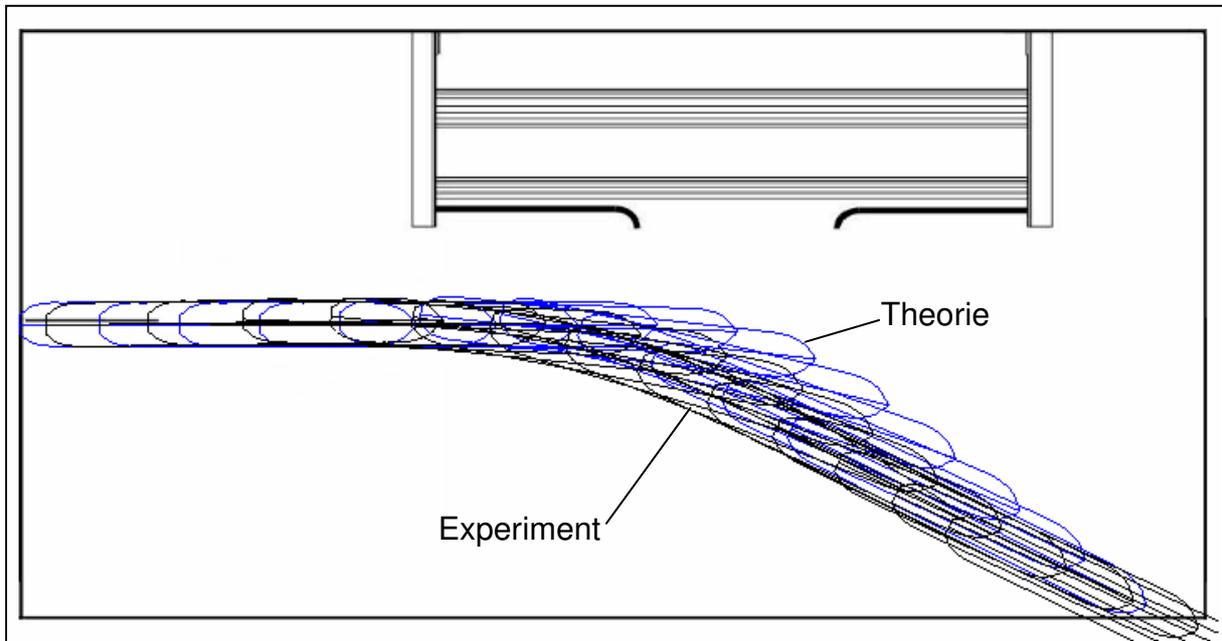


Bild 5.4 Simulierte (blau) und gemessene (schwarz) Modellbahnen

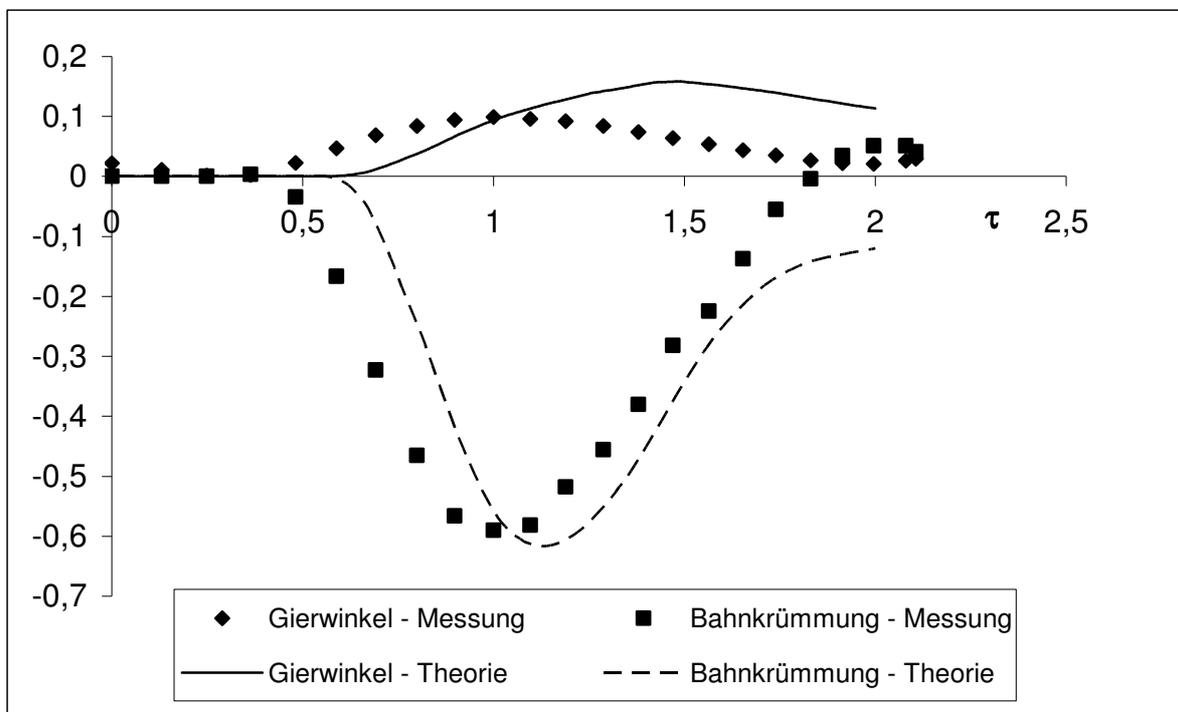


Bild 5.5 Berechnete und gemessene Gierwinkel β und Bahnkrümmung Ω

Bei der simulierten Bewegung fängt das Modell sich erst zu drehen an, nachdem sein Bug den Bereich erreicht, in dem Querstrom generiert wurde. Die Drehbewegung wird durch die Lasten hervorgerufen, die durch die Queranströmung entstehen. Nach dem theoretischen Modell entstehen diese Lasten erst, nachdem die Gewässerströmung eine Querkomponente in Schiffsquerrichtung liefert. Unter der Annahme, dass das Modell die Strömung nicht beeinflusst, geschieht dies erst, wenn das der Bug des Modells in die Querströmung eintritt.

Aus den Ergebnissen, dargestellt im Bild 5.5, geht hervor, dass auf das Schiffsmodell noch vor dem Eintritt in die ungestörte Strömung strömungsbedingte Lasten wirken. Das kann auf mögliche Wechselwirkungen zwischen dem sich bewegenden Modell und dem umgebenden Wasser zurückgeführt werden.

Durch die Bewegung eines Festkörpers in einer Flüssigkeit werden die Flüssigkeitsteilchen in unmittelbarer Nähe des Körpers beschleunigt. Wenn der Körper symmetrisch bezüglich seiner Geschwindigkeitsrichtung ist, resultiert aus der beschleunigten Flüssigkeit eine symmetrische Strömung um den Körper. Diese führt nur zu der Ausbildung einer Kraft, die entgegen der Strömungsrichtung wirkt. Eine unsymmetrische Umströmung führt zur Ausbildung von Kräften, die auch quer zu Bewegungsrichtung wirken.

Bei der Bewegung des Schiffsmodells auf gerader Bahn wird auch das Wasser vor dem Bug beschleunigt. Das von dem Modell beschleunigte Wasser im Bugbereich erreicht den Bereich der Querströmung noch bevor das Schiff diesen Bereich selbst erreicht hat. Die Wechselwirkung zwischen dem vom Schiff beschleunigten Wasser und der Strömung führt zu einer unsymmetrischen Umströmung des Körpers im Vorschiffbereich. Diese führt wahrscheinlich zur Ausbildung von unsymmetrischen Lasten, die bereits die Drehung des Schiffes einleiten.

Diese Analyse lässt darauf schließen, dass das „verspätete“ Verlassen der geraden Bahn von dem theoretischen Modell auf die Vernachlässigung dieser Wirkung auf das sich bewegende Schiff zurückzuführen ist.

Bei einer Vorbeifahrt dicht an einer seitlichen Begrenzung des Fahrwassers kann es zur Ausbildung von Kräften kommen, die das Schiff von einer Geradeausfahrt abbringen.

Die auf dem Doppelboden montierte Einrichtung zur Erzeugung der Querströmung ist gleichzeitig auch eine seitliche Begrenzung des Fahrwassers. Um den Einfluss der Einrichtung auf die Modellbewegungen zu untersuchen, wurden Experimente ohne Querströmung durchgeführt. Das beschleunigte Schiffsmodell fuhr dabei über die gesamte Messstrecke, ohne die gerade Bahn zu verlassen. Dies lässt einen Einfluss der seitlichen Begrenzung des Fahrwassers auf die Schiffsbewegungen für den untersuchten Fall ausschließen.

Weitere Gründe für die Abweichungen ist die Ungenauigkeit der Methoden, die für die Berechnung der Rumpflasten eingesetzt wurden. Die Genauigkeit dieser Methode wurde schon im Kapitel „Modellversuche im Windkanal“ untersucht.

5.2 Simulationsrechnungen für die Binger-Loch-Strecke

Um den Einfluss der Strömung auf ein unter realen Bedingungen fahrendes Schiff zu verdeutlichen, werden in diesem Kapitel Ergebnisse von Bewegungssimulationen der Binger-Loch-Strecke auf dem Rhein dargestellt. Weiterhin werden Simulationsergebnisse und Daten von einer Messfahrt mit dem realen Schiff dargestellt und diskutiert.

Die Strecke befindet sich zwischen den Rheinkilometern 527,5 und 533. Charakteristisch für diesen Rheinabschnitt ist eine Verengung des Flussbettes, was zu einer Erhöhung der Fließgeschwindigkeit führt. Die Strömungsverhältnisse auf der Strecke bei einem Wasserstand von 3,5 m sind auf Bild 5.6 dargestellt. Bei diesem Wasserstand beträgt die Wassertiefe im Fahrwasser ungefähr 4 m. Die Daten sind von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) zur Verfügung gestellt worden.

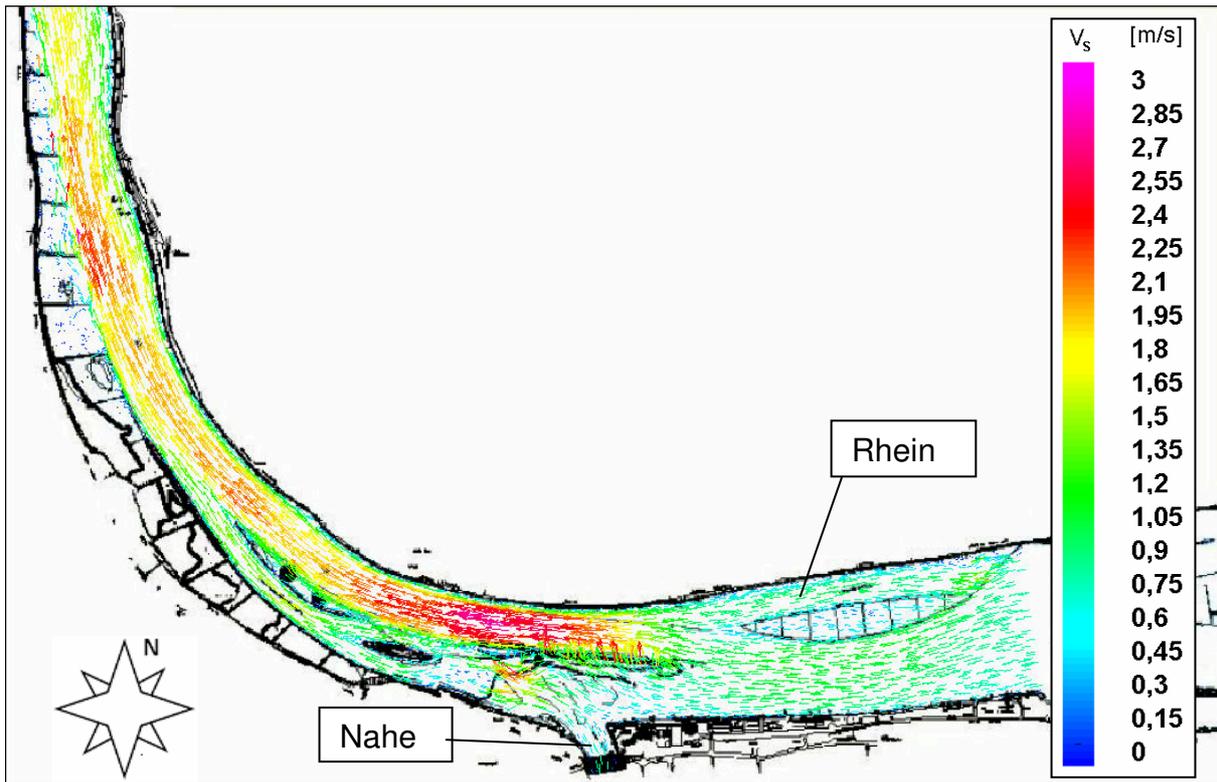


Bild 5.6 Strömungsverhältnisse auf der Binger-Loch-Strecke

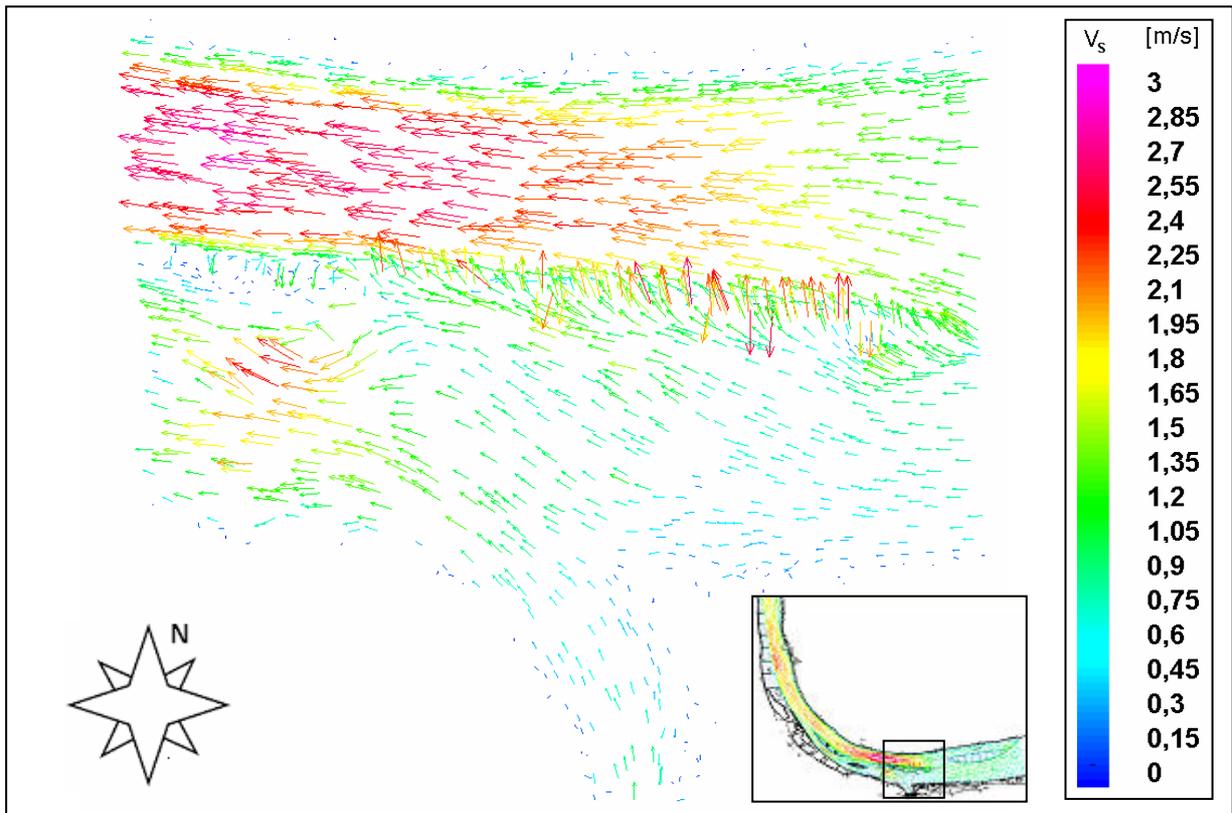


Bild 5.7 Strömungsverhältnisse in der Nähe der Nahemündung

In den meisten Teilen der Strecke verläuft die Strömung parallel zum Ufer und fließt von Südost nach Nordwest. Es sind Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 3 m/s zu beobachten. In dem Abschnitt in der Nähe der Nahemündung gibt es Bereiche, in dem das Wasser quer zur Hauptströmungsrichtung fließt (Bild 5.7).

Simuliert wurde die Fahrt eines 100 m langen und 11 m breiten Schiffes bei einem Tiefgang von 2,8 m und einer Wassertiefe von 4 m auf einer vorgegebenen Route.

Der Schiffswiderstand wurde anhand experimenteller Ergebnisse [Kyulevcheliy, 2004] abgeschätzt. Der Propellerschub wurde anhand eines von der BAW zur Verfügung gestellten Freifahrt diagrams berücksichtigt. Die Sog- und Nachstromziffer wurden mithilfe empirischer Formeln berücksichtigt. Die Propellerdrehzahl wurde so gewählt, dass das Schiff eine Geschwindigkeit von 3,5 m/s im ruhenden Wasser erreicht.

In den folgenden Bildern sind die Fahrspuren des Schiffes bei Talfahrt (Fahrt in Strömungsrichtung) und Bergfahrt abgebildet. Im Bild 5.8 sind Ergebnisse einer Bewegungssimulation ohne Berücksichtigung des Stromes dargestellt. Die nord-östliche (innere) Fahrspur stellt die Route der Talfahrt, die süd-westliche (äußere) die der Bergfahrt dar. Die Fahrspurbreite kann anhand des Schiffskurses und dessen Geometrie sowie der berechneten Bahnkrümmung und Gierwinkel (Bilder 5.10. bis 5.14) berechnet werden [Dettmann, 2002].

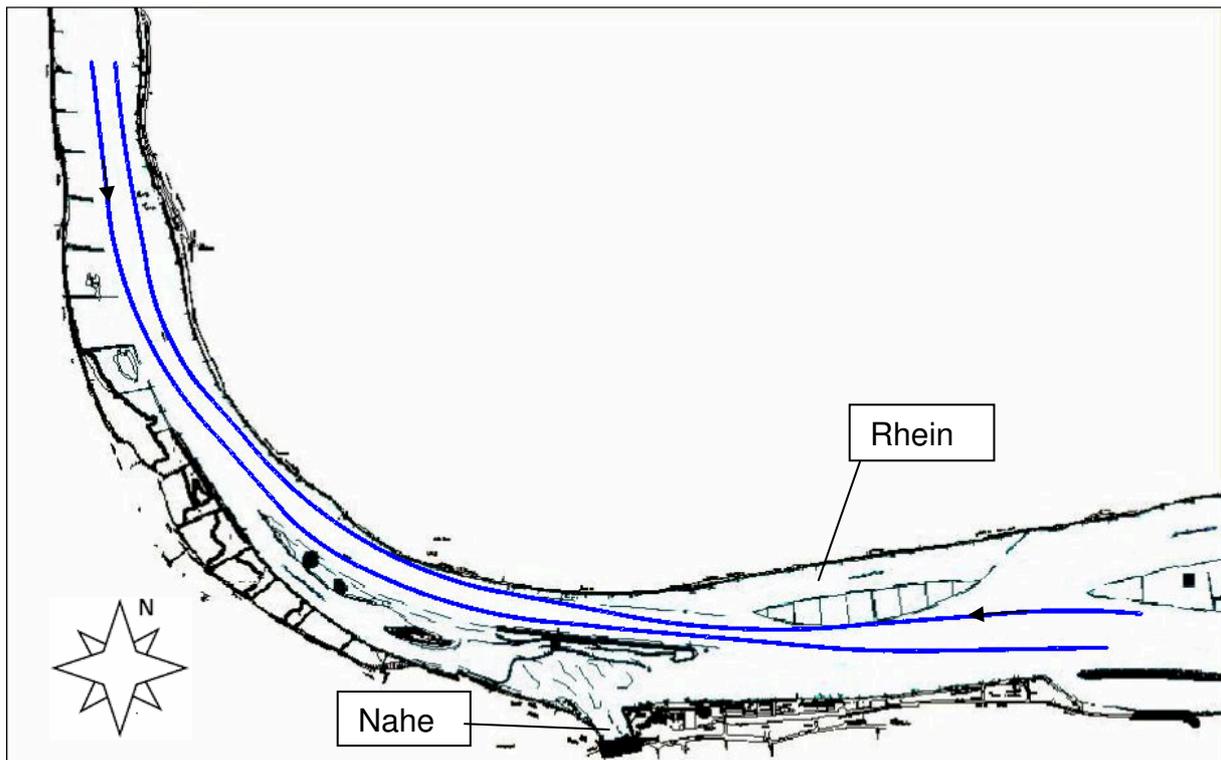


Bild 5.8 Simulationsrechnung Talfahrt und Bergfahrt ohne Strömung

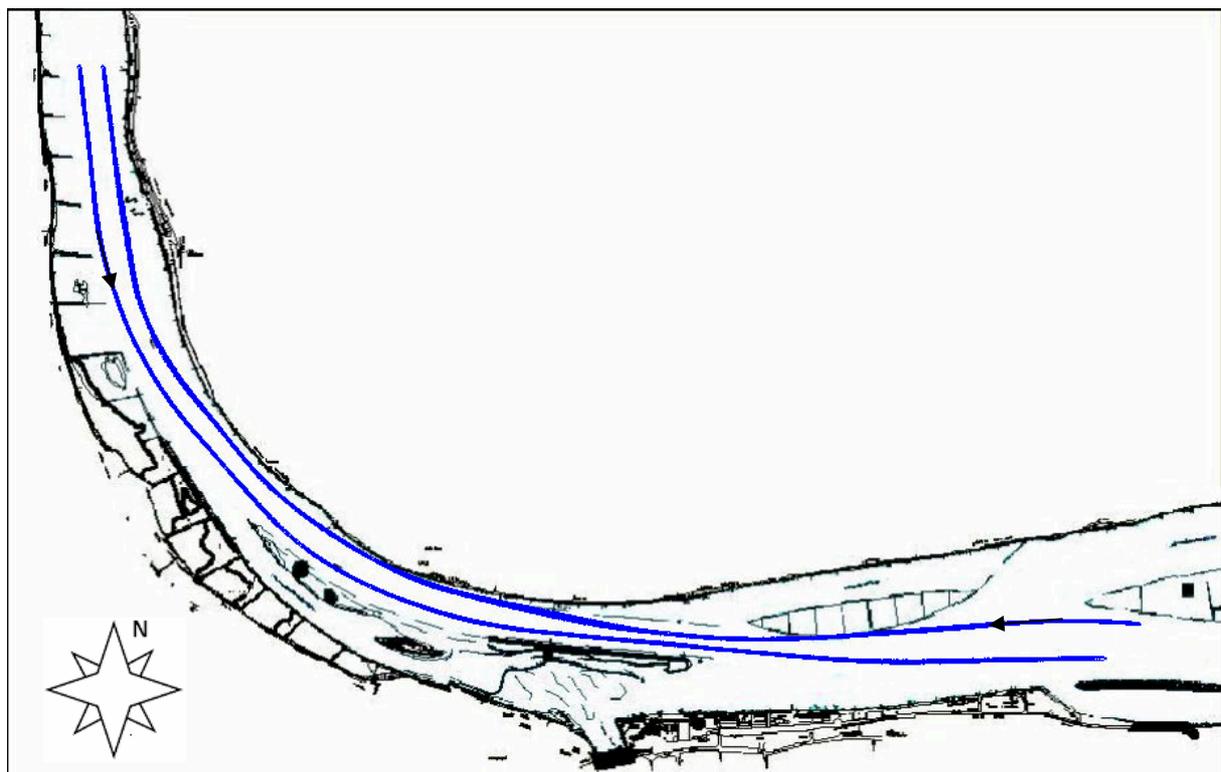


Bild 5.9 Simulationsrechnung Talfahrt und Bergfahrt mit Strömung

Ein Vergleich der Fahrspuren im Bild 5.8 mit den Fahrspuren berechnet mit Berücksichtigung des Stroms im Bild 5.9 macht eine Verbreiterung der Fahrspur beim Manövrieren im Strom deutlich. Dies gilt vor allem für die Talfahrt. Diese

Tatsache entspricht auch den Beobachtungen von [Vasilev, 1989] und [Dettmann, 2002], dass eine Kreisfahrt in die Strömungsrichtung immer mit einer Gierwinkelerhöhung verbunden ist. Dabei wird nur eine Strömung, die stets parallel zur Schiffsroute verläuft, betrachtet.

Da die Breite der Schiffsspur neben der Schiffsgeometrie hauptsächlich von dem Gierwinkel abhängig ist [Kolarov, Paschen, 2006], kann die Analyse des Einflusses des Stroms auf den Platzbedarf anhand des Verlaufs des Gierwinkels über die Zeit durchgeführt werden. Im Bild 5.10 sind die Verläufe des Gierwinkels auf der Talfahrt im ruhenden und fließenden Wasser gegenüber gestellt. Es ist eine deutliche Erhöhung des Gierwinkels beim Manövrieren im Strom zu erkennen. Der maximale Gierwinkel im Strom entspricht ungefähr dem zehnfachen des maximalen Gierwinkels im ruhenden Wasser. Wird von einer Strömung ausgegangen, die stets parallel zu der Schiffsroute gerichtet ist [Vasilev, 1989], so ist der Gierwinkel bei der Talfahrt zwar größer als im ruhenden Wasser weist aber einen ähnlichen charakteristischen Verlauf über die Zeit auf, d.h., die beiden Kurven verlaufen näherungsweise parallel. Um dies zu verdeutlichen, wurde eine weitere Simulationsrechnung für eine Strömung parallel zur vorgegebenen Route mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 2 m/s durchgeführt. Der so berechnete Verlauf des Gierwinkels ist den Verläufen der Gierwinkel ohne und mit Berücksichtigung einer unregelmäßigen Strömung gegenüber gestellt (Bild 5.10). Es ist deutlich zu sehen, dass der Gierwinkel in der unregelmäßigen Strömung auch bedeutend größer ist als der Gierwinkel bei Bewegung in der parallelen Strömung, obwohl die beiden dieselbe Hauptrichtung und ungefähr dieselbe Größe besitzen. Dies macht deutlich, dass für Simulationen in Gewässern mit unregelmäßigen Strömungsverhältnissen nur solche Methoden eingesetzt werden können, die die genaue Form der Strömung berücksichtigen.

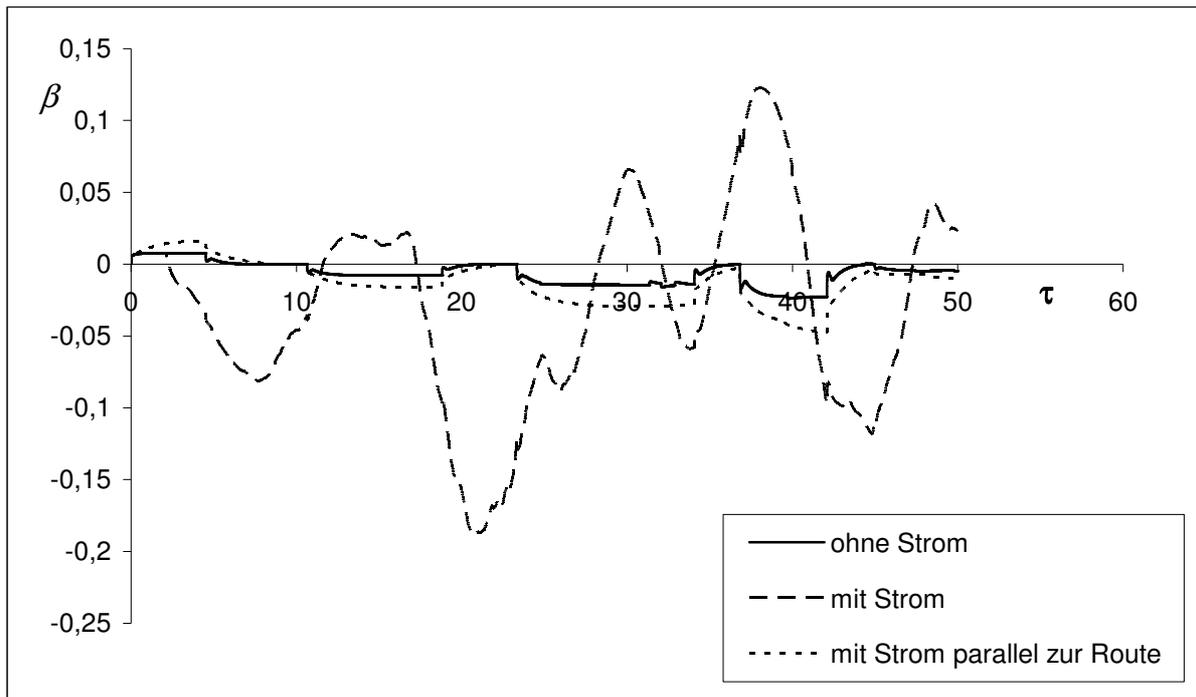


Bild 5.10 Gierwinkel auf der Talfahrt

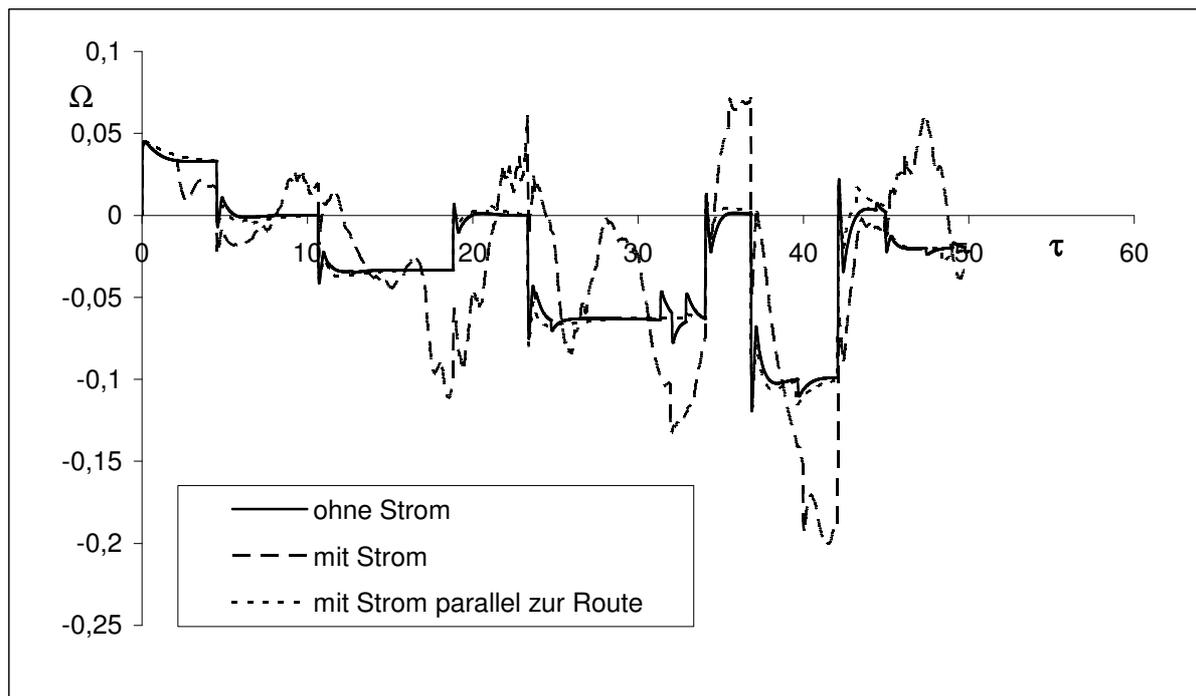


Bild 5.11 Bahnkrümmung auf der Talfahrt

In den Bildern 5.12 und 5.13 sind die berechneten Verläufe von Gierwinkel und Bahnkrümmung auf der Bergfahrt für drei verschiedene Strömungsverhältnisse dargestellt. Der Vergleich zwischen den theoretisch berechneten Kurven im ruhenden Wasser und in einem parallelen Strom zeigt eine Verminderung des Gierwinkels bei Berücksichtigung des Stromes. Dies entspricht auch den

Beobachtungen von [Vasilev, 1989] und [Dettmann, 2002]. Die unregelmäßige Strömung führt genau wie bei der Talfahrt zu einer Erhöhung des Gierwinkels. Diese Tatsache kann damit erklärt werden, dass die Route nicht parallel zur Strömung verläuft. Erreicht das Schiff die Nahemündung (siehe Bild 5.7) bei $\tau = 30$, so durchquert das Schiff ein Gebiet mit seitlicher Strömung. Dies führt zu der deutlichen Erhöhung des Gierwinkels ab diesem Zeitpunkt.

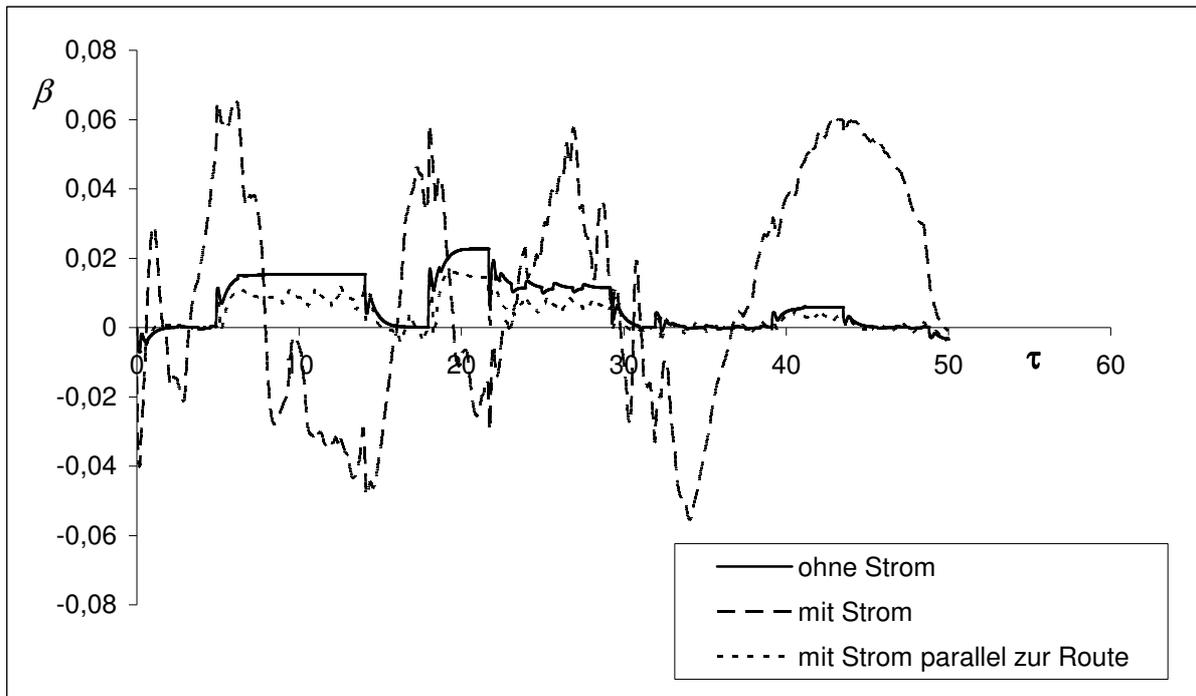


Bild 5.12 Gierwinkel auf der Bergfahrt

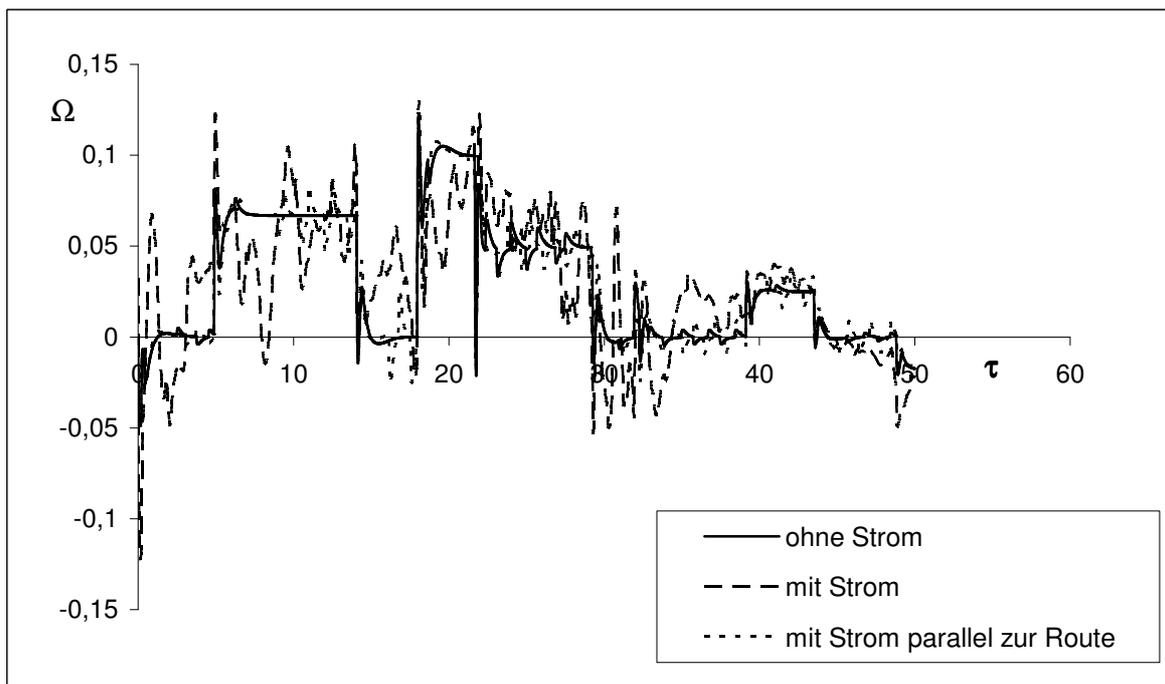


Bild 5.13 Bahnkrümmung auf der Bergfahrt

Da die größten Gierwinkel bei der Vorbeifahrt an der Nahe-Mündung und östlich davon auftreten, werden die Strömungsverhältnisse und die simulierten Schiffsbahnen in den folgenden Bildern dargestellt. Im Bild 5.14 sind die Strömungsverhältnisse sowie die gefahrenen Routen bei der Berg- (unten) und der Talfahrt (oben) in einem 700 m langen Bereich östlich der Nahe-Mündung dargestellt. Der Schwerpunkt des auf der Talfahrt fahrenden Schiffes erreicht diesen Flussabschnitt bei $\tau = 9$ (d.h. nachdem er einen Weg, der 9 Schiffslängen entspricht, nach dem Start der Simulation zurückgelegt hat) und verlässt ihn bei $\tau = 16$. Das Schiff auf der Bergfahrt erreicht den Bereich bei $\tau = 35,5$ und verlässt ihn bei $\tau = 42,5$. Aus Diagramm 5.12 ist eindeutig zu entnehmen, dass am Ende dieses Bereiches der Gierwinkel des auf der Bergfahrt fahrenden Schiffes sein Maximum erreicht. Im Bild 5.14 ist zu sehen, dass am östlichen Ende des Bereiches die Flussströmung schräg gegenüber den beiden Routen fließt. Das ist der Grund, warum in diesem Bereich eine Erhöhung des Gierwinkels bei beiden Fahrten auftritt. Am westlichen Rand des Bereiches ist die äußere Strömung parallel zu den Routen, was zu einer Verminderung des Gierwinkels in diesem Bereich führt (siehe Diagrammen 5.10 und 5.12). Die maximale Strömungsgeschwindigkeit in diesem Bereich ist 1,5 m/s. Der maximale Gierwinkel auf der Talfahrt in dem Abschnitt auf Bild 5.14 tritt bei $\tau = 9$ auf und beträgt ungefähr 0,06 rad. Auf der Bergfahrt erreicht der Gierwinkel bei $\tau = 42,5$ (d.h. am Ende des Bereiches) und beträgt dabei etwa 0,07 rad. Das ist auch der maximale Gierwinkel auf der gesamten Bergstrecke.

Der maximale Gierwinkel auf der Talfahrt tritt in dem Bereich $16 \leq \tau \leq 23$ auf (Bild 5.15). Das ist der Bereich in unmittelbarer Nähe der Nahe-Mündung. In dem Bereich sind die Strömungsgeschwindigkeiten am höchsten (Bild 5.7). Die Geschwindigkeit erreicht abschnittsweise bis zu 3 m/s. Das Gierwinkelmaximum wird bei $\tau = 20$ erreicht und beträgt 0,19 rad. Er ist damit deutlich höher als der maximale Gierwinkel auf der Bergfahrt. Aus dem Verlauf der Bahnkrümmung bei Bewegung im ruhenden Wasser (Bild 5.11) wird deutlich, dass zu diesem Zeitpunkt das Schiff auf einem geraden Teil der vorgegebenen Route fährt. Im Bild 5.15 ist zu erkennen, dass die Talroute in diesem Bereich schräg zur Strömung verläuft. Die Querkomponente der Strömung bezogen auf das schiffsfeste Koordinatensystem und die sehr hohe Strömungsgeschwindigkeit in dem untersuchten Bereich sind die Gründe dafür, dass auf einer geraden Bahn die höchsten Gierwinkel auftreten.

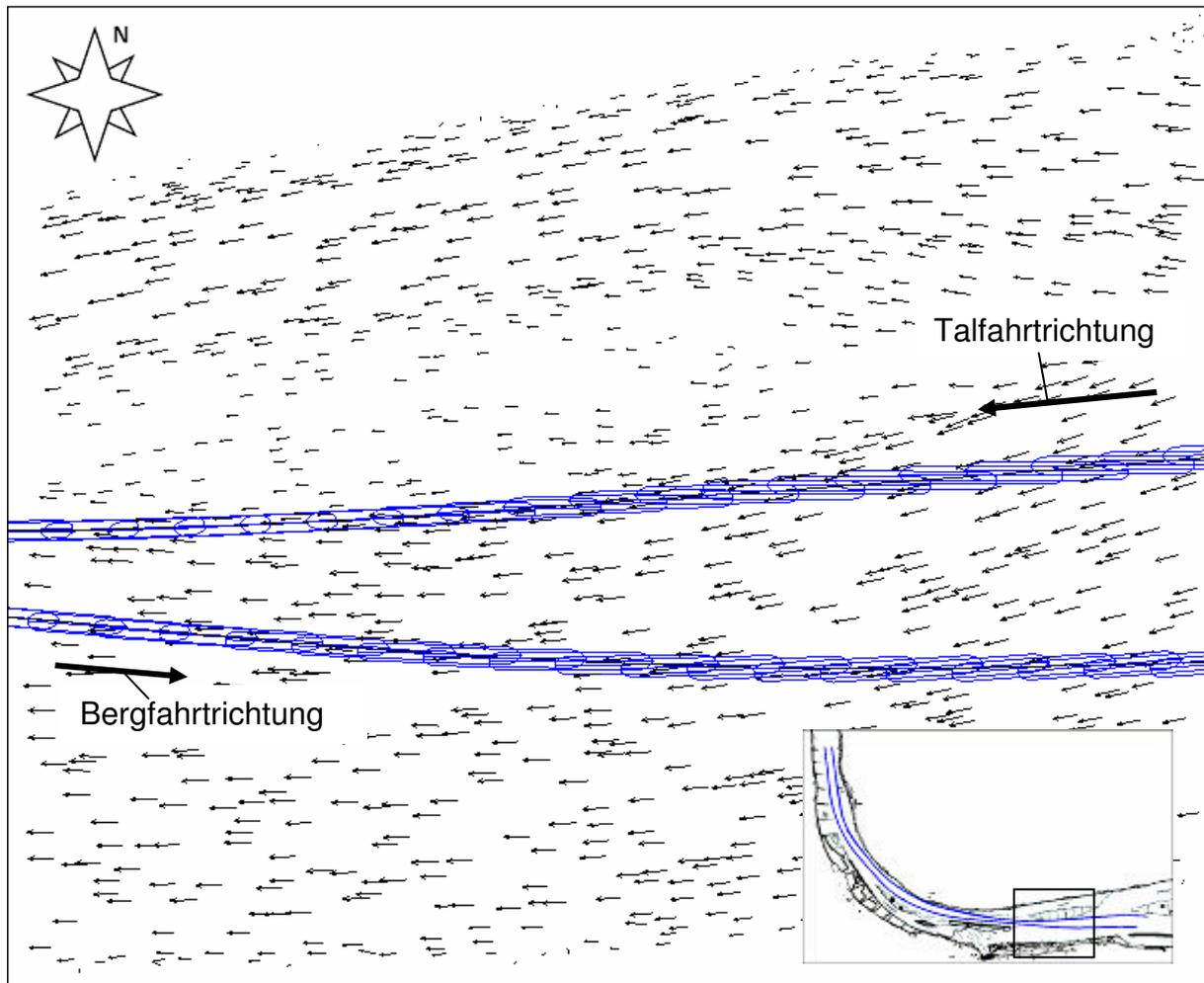


Bild 5.14 Schiffsbahnen und Strömungsverhältnisse bei $9 \leq \tau \leq 16$ auf der Talfahrt (oben) und $35,5 \leq \tau \leq 42,5$ auf der Bergfahrt (unten)

Im westlichen Bereich des in Bild 5.15 dargestellten Abschnitts verläuft die Strömung parallel zur Fahrtrichtung des bergauf fahrenden Schiffes. Daher ist in diesem Bereich keine große Erhöhung des Gierwinkels zu beobachten. Am östlichen Ende des Abschnittes fährt das Schiff in einen Bereich, in dem die Strömungsrichtung schräg zu der Route gerichtet ist. Das führt zu der beobachteten Gierwinkelerhöhung.

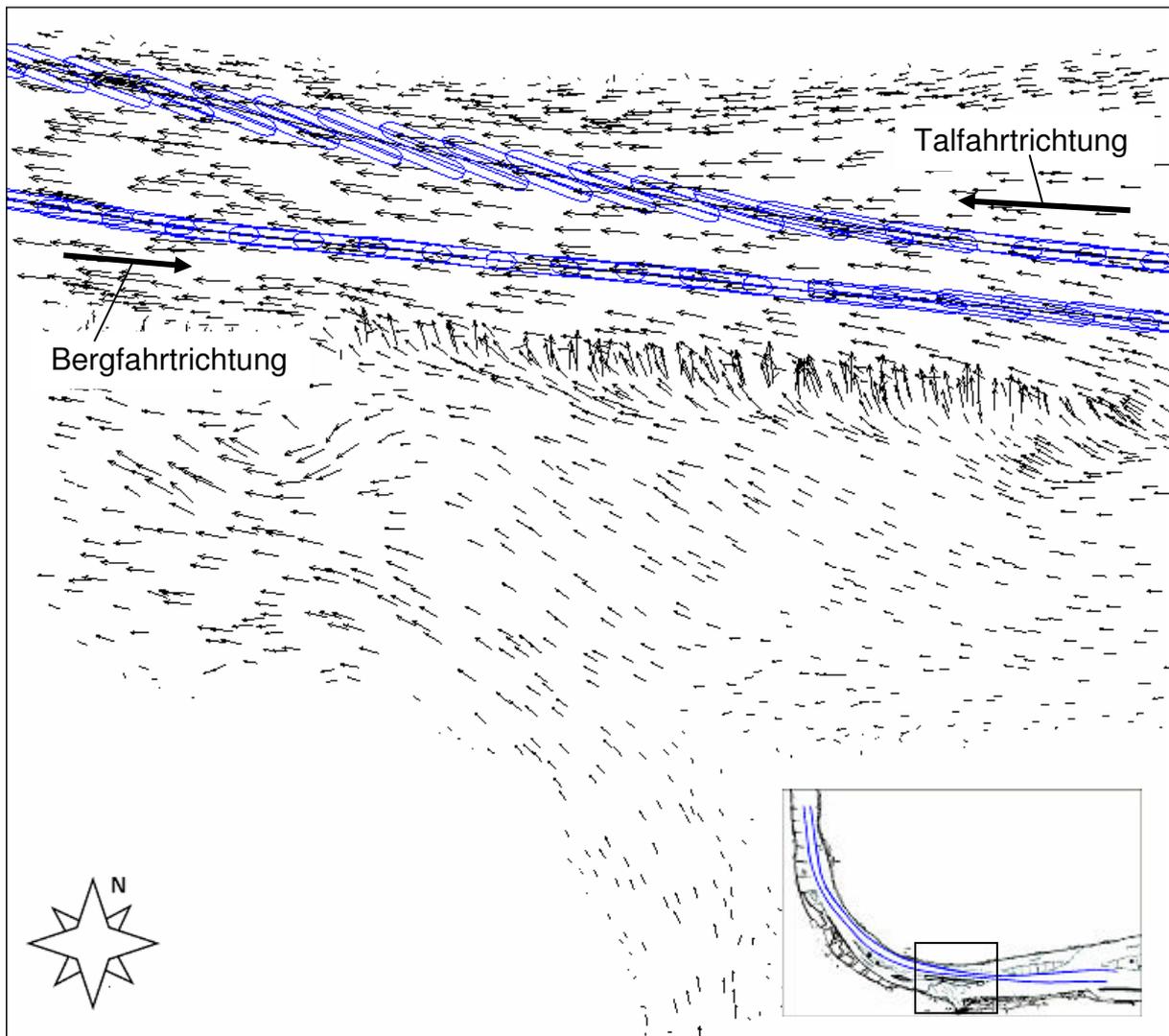


Bild 5.15 Schiffsbahnen und Strömungsverhältnisse bei $16 \leq \tau \leq 23$ auf der Talfahrt (oben) und $28,5 \leq \tau \leq 35,5$ auf der Bergfahrt (unten)

Die Analyse der Simulationsergebnisse zeigt, dass die Gewässerströmung einen großen Einfluss auf die Fahrspurbreite ausübt. Ein minimaler Platzbedarf ergibt sich, wenn die gefahrene Route parallel zu der Strömung verläuft. In diesem Fall ist der Platzbedarf bei Bewegung gegen die Strömung sogar kleiner als bei Bewegung im ruhenden Wasser. Eine Fahrt in Strömungsrichtung führt im allgemeinen zu einer Erhöhung des Platzbedarfs. Ein sehr hoher Platzbedarf ergibt sich, wenn die zu fahrende Route schräg oder quer zu der Strömung verläuft. Eine Erhöhung des Platzbedarfes kann es auch bei einer Fahrt geben, deren Hauptrichtung gegen die Strömung gerichtet ist, wenn sich aufgrund der örtlichen Strömung eine Queranströmung des Schiffskörpers einstellt. Der Platzbedarf ist auch von dem Verhältnis zwischen der Strömungsgeschwindigkeit und der Schiffsgeschwindigkeit

über Boden abhängig. Eine höhere Strömungsgeschwindigkeit bei gleichbleibender Geschwindigkeit über Boden führt in der Regel zu einem höheren Platzbedarf. Bei einer Fahrt parallel gegen die Strömung führt eine höhere Strömungsgeschwindigkeit zu einer Verminderung des Platzbedarfes.

In den folgenden Bildern und Diagrammen sind die Ergebnisse von Naturmessungen sowie von Bewegungssimulationen gegenübergestellt. Im Bild 5.16 sind die gemessenen und simulierten Schiffsbahnen der MS-Main auf der Berg- und Talfahrt bei der Durchfahrt der Binger-Loch-Strecke dargestellt.

Die Messdaten wurden mithilfe von GPS-Technik gewonnen. Am Bug und am Heck des Schiffes wurde jeweils ein GPS-Empfänger montiert. Mithilfe der Empfänger wurde die Lage des Schiffes in einem Zeittakt von einer Sekunde eindeutig bestimmt und die Daten zur nachfolgenden Auswertung gespeichert. Die Auswertung der Messergebnisse erfolgte auf eine ähnliche Art und Weise wie im Kapitel 4.2.2 beschrieben.

Für die Berechnung der theoretischen Daten wurde ein Regler eingesetzt. Dieser Regler ermöglichte die virtuelle Steuerung des Schiffes auf einer vorgegebenen Route. Als Vorgabe wurde die vom realen Schiff gefahrene Route eingesetzt.

Ziel des hier vorgestellten Vergleichs ist es, den berechneten und den durch Messungen ermittelten Platzbedarf zu vergleichen. Es ist eindeutig, dass die gefahrene und die simulierte Route aufeinander liegen (siehe Bild 5.16). Deswegen ist es ausreichend, den berechneten und den gemessenen Gierwinkel gegenüberzustellen, um Aussagen über die Genauigkeit der angewendeten Methoden zu treffen. In Bildern 5.17 und 5.18 ist der Verlauf der beiden Größen über der dimensionslosen Zeit dargestellt.

Den Diagrammen (Bild 5.17 und 5.18) ist zu entnehmen, dass bei dem untersuchten Fall der gemessene und der berechnete Gierwinkel bei der Bergfahrt größer als die entsprechenden Werte bei der Talfahrt sind. Allgemein gilt, dass ein Schiff bei der Fahrt gegen die Strömung einen geringeren Platzbedarf aufweist [Dettmann, 2003]. Diese Aussage ist bei dem untersuchten Abschnitt nicht gültig.

Das auf der Talroute fahrende Schiff bewegt sich überwiegend parallel zu der Strömung mit einer relativ hohen Geschwindigkeit gegenüber dem Boden von bis zu 6 m/s. Die hohe Geschwindigkeit über dem Boden bedingt gemäß Gleichung (3.25) einen kleineren örtlichen Anstellwinkel. Bei Bewegung in Strömungsrichtung führt das zu einem geringeren Gierwinkel.

Die größten Gierwinkel bei der Bergfahrt sind bei zwei Kurskorrekturen aufgetreten, die möglicherweise durch ein Überholmanöver bedingt wurden. Im Bild 5.16 sind die Stellen, an denen die Kurskorrekturen erfolgten, mit A und B gekennzeichnet. Bei der Ausführung der beiden Manöver stellt sich das Schiff kurzzeitig schräg zur Strömung, was zu der gemessenen Gierwinkelhöhung führt.

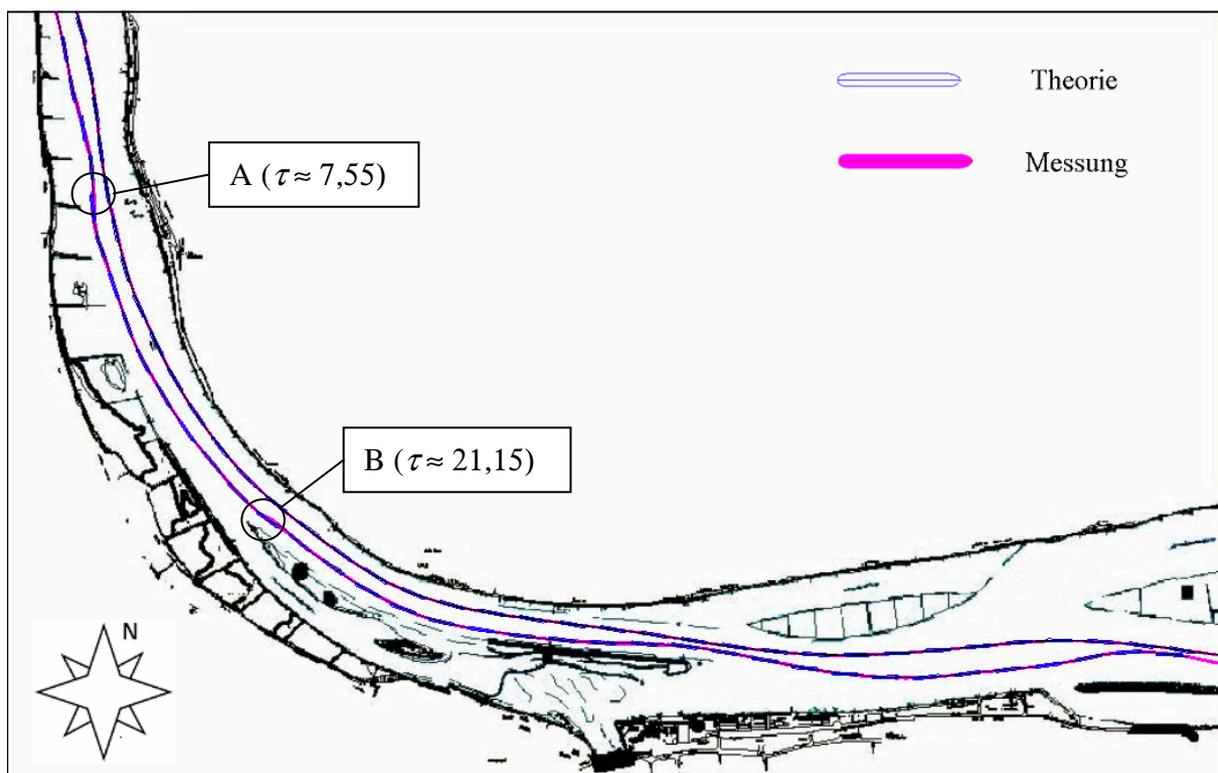


Bild 5.16 Gemessene und simulierte Schiffsspuren auf der Binger-Loch-Strecke

Der Vergleich zwischen dem theoretisch berechneten und dem gemessenen Gierwinkel auf der Bergfahrt (Bild 5.17) zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Die Werte bei der Talfahrt weisen auch eine gute Übereinstimmung über den größten Teil der Strecke auf. Eine deutliche Abweichung ist in dem Bereich zwischen $\tau = 20$ und $\tau = 27$ zu beobachten. Bei der Talroute ist das der Abschnitt im Bereich der

Nahemündung. Dieser Abschnitt ist charakterisiert durch die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten auf der gesamten Strecke, wie den Bildern 5.6 und 5.7 zu entnehmen ist.

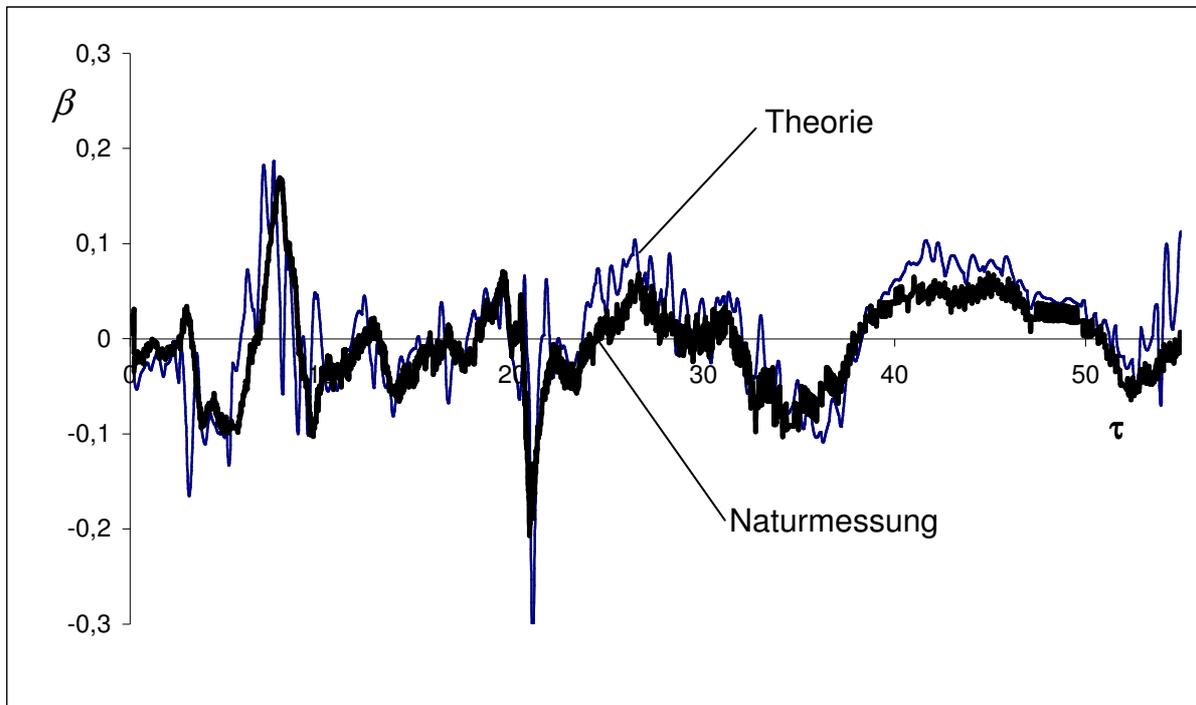


Bild 5.17 Berechneter und gemessener Gierwinkel auf der Bergfahrt

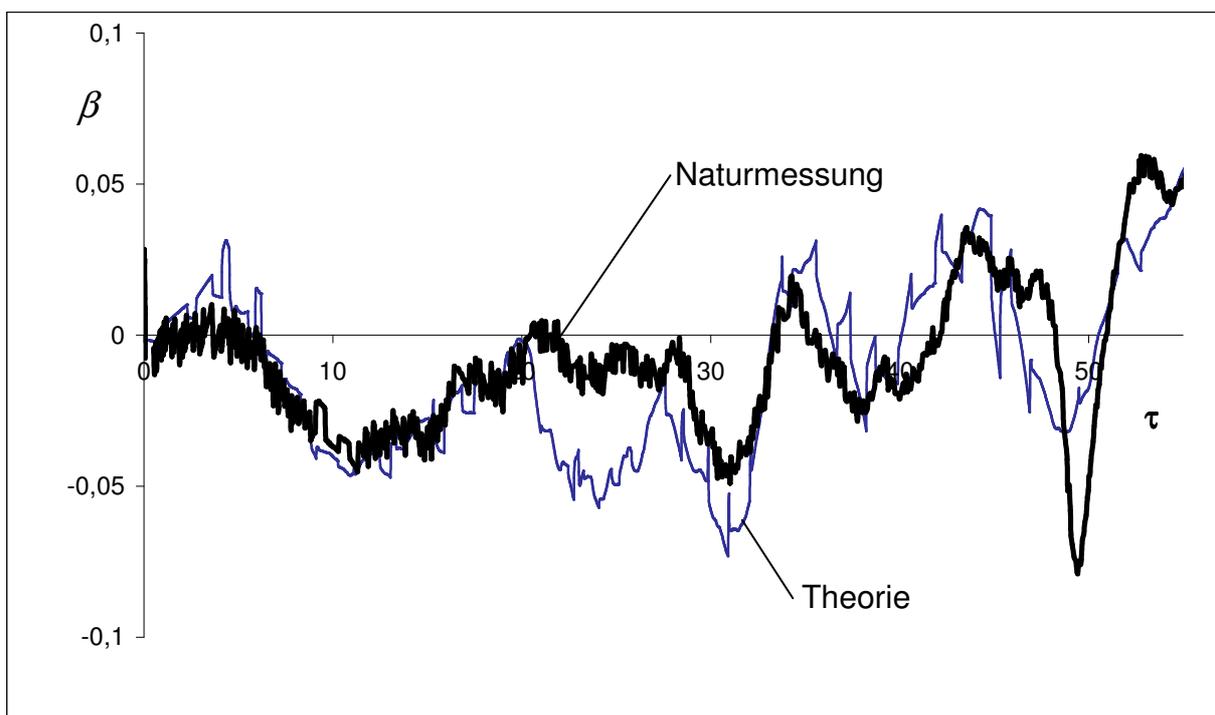


Bild 5.18 Berechneter und gemessener Gierwinkel auf der Talfahrt

Um die möglichen Ursachen für die Abweichung im Bild 5.18 zu untersuchen, wird zunächst der betreffende Abschnitt im folgenden Bild 5.19 dargestellt. In diesem Bild werden die gemessene und die simulierte Schiffspur für $20 < \tau < 27$ gezeigt. Die auf der Route gezeichneten Schiffssymbole zeigen die eindeutige Lage des Schiffes bei ausgewählten Zeitpunkten. Es ist zu sehen, dass das reale Schiff unter einem sehr kleinen Gierwinkel über den gesamten Abschnitt fährt. Daraus und aus der Tatsache, dass der Abschnitt näherungsweise gerade ist, lässt sich schließen, dass die reale Strömungsrichtung in diesem Gewässerabschnitt nahezu parallel zur Schiffsbewegungsrichtung verläuft.

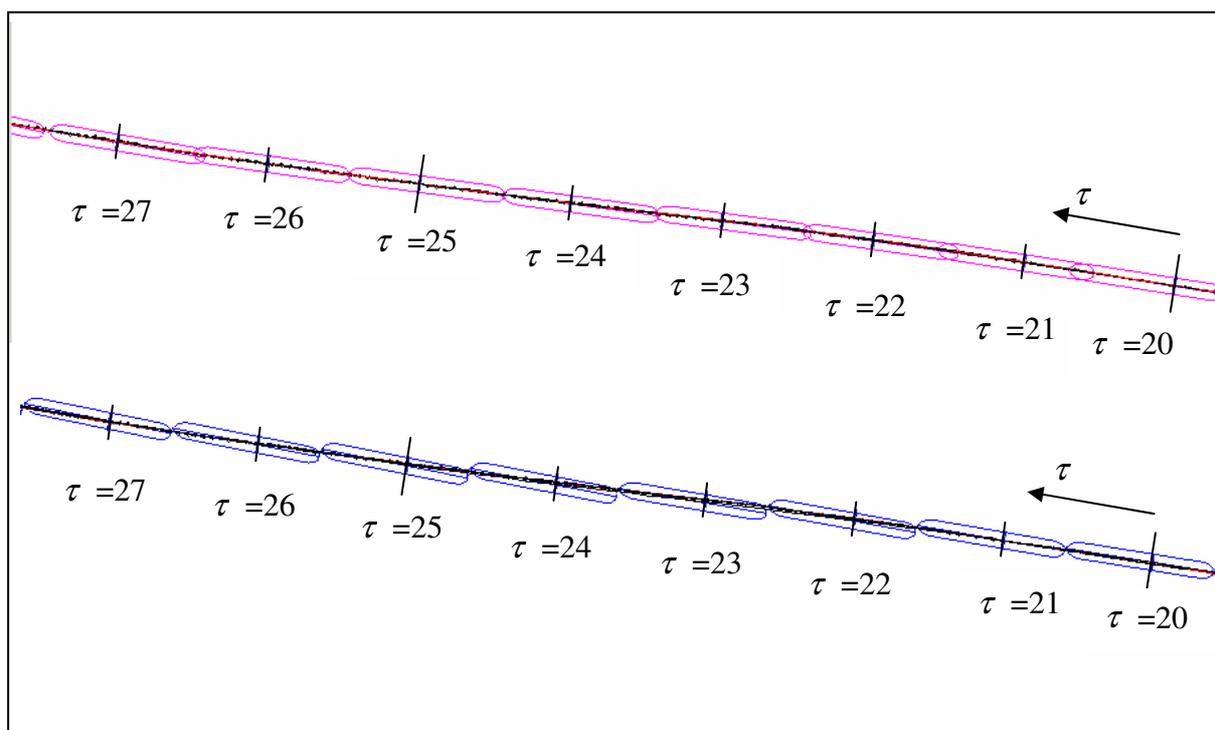


Bild 5.19 Gemessene (oben) und simulierte (unten) Schiffspur bei $20 < \tau < 27$

Im Bild 5.20 ist die Strömungsverteilung über die Schiffslängsrichtung eines ohne Gierwinkel fahrenden Schiffes bei $\tau = 23$ dargestellt. Die vorgestellte Strömungsverteilung wurde anhand der von der BAW zur Verfügung gestellten Daten berechnet. Es ist eindeutig zu sehen, dass die Strömung schräg zu dem Schiff verläuft. Diese Tatsache widerspricht der obigen Überlegung, woraus sich schließen lässt, dass möglicherweise die Strömungsdaten in diesem Abschnitt nicht den realen Strömungsverhältnissen am Tag des Naturversuches entsprechen.

Bei der Simulation ist im betreffenden Bereich ein deutlich höherer Gierwinkel als bei der Messung zu beobachten (siehe Bilder 5.18 und 5.19). Der Gierwinkel erreicht sein lokales Maximum bei $\tau = 23$. Das liegt daran, dass zu diesem Zeitpunkt die Richtung der Strömung schräg zu der Schiffsbewegungsrichtung verläuft (Bild 5.20).

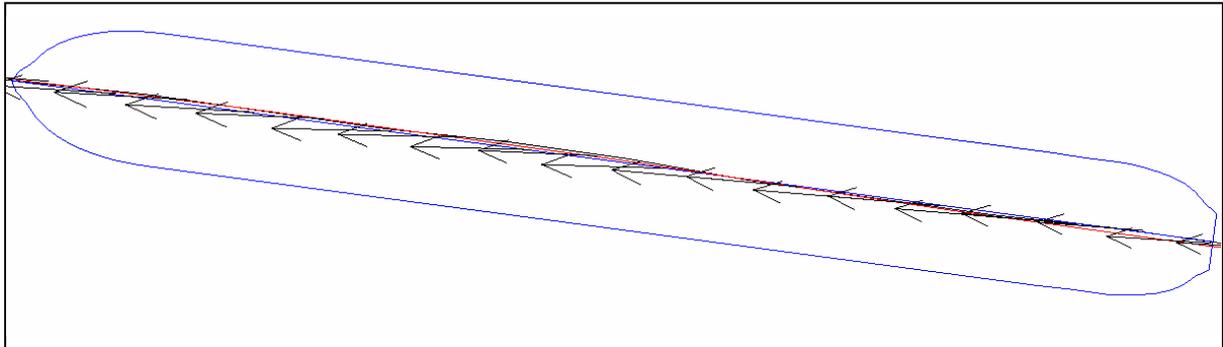


Bild 5.20 Strömungsverteilung bei $\tau = 23$

6 Zusammenfassung

Ziel der durchgeführten Untersuchungen war es, ausgehend von den Bewegungsgleichungen den Einfluss einer zweidimensionalen Gewässerströmung auf das Fahrverhalten von Binnenschiffen zu untersuchen.

Dazu wurden zum einen die Bewegungsgleichungen um den Impuls der äußeren Strömung erweitert, um die Trägheitswirkung der Strömung zu erfassen und zum anderen wurden Möglichkeiten gesucht, die strömungsbedingten Kräfte infolge Zähigkeit und Wirbelbildung mit vertretbarem Zeitaufwand theoretisch zu berechnen.

Ausgehend von der Theorie des schlanken Körpers wurde die Trägheitswirkung der Gewässerströmung mithilfe der hydrodynamischen Massenverteilung über die Schiffslänge erfasst. Dabei wurde angenommen, dass der Schiffskörper die äußere Strömung nicht beeinflusst. Die hydrodynamischen Massen der einzelnen Querschnitte wurden mithilfe des Paneelverfahrens unter Annahme einer ebenen Umströmung berechnet. Dabei wurde auch der Einfluss der Wassertiefe mitberücksichtigt.

Die Finite-Volumen-Methode wurde aufgrund ihres hohen Zeitaufwands als ungeeignet für die Berechnung der äußeren Kräfte infolge einer variierenden Strömung gefunden. Daher wurde auf weniger aufwendige Näherungsverfahren zurückgegriffen.

Bei der Berechnung der äußeren Lasten, die auf den Schiffsrumpf wirken, wurde eine Unterteilung der Kräfte in einen linearen und einen nichtlinearen Anteil vorgenommen. Entsprechend der Konzeption des schlanken Körpers ergibt sich die Querkraftverteilung der linearen Kraft aus der Änderung des hydrodynamischen Impulses über die Schiffslänge. Als Abflussbedingung wurde angenommen, dass keine Impulsrücklenkung stattfindet. Für die Erfassung der nichtlinearen Kräfte wurde das Querströmungswiderstandskonzept angewendet. Dabei wurde die Kraft an jedem Spant mithilfe eines Querwiderstandsbeiwertes und der jeweiligen Querstromgeschwindigkeit gegenüber Wasser berechnet.

Die für die Berechnung der linearen Kräfte benötigte hydrodynamische Massenverteilung wurde mit dem Paneelverfahren berechnet.

Um den Aufwand für die Ermittlung des Querwiderstandsbeiwertes zu minimieren, wurde bei der Erfassung der nichtlinearen Kräfte davon ausgegangen, dass der Querwiderstandsbeiwert konstant über die Schiffslänge und gleich dem Querwiderstandsbeiwert des Mittelschiffes ist. Er wiederum wurde mithilfe von Modellexperimenten im Windkanal gewonnen.

Durch das Impulsverfahren und das Querströmungswiderstandskonzept lässt sich die Querkraft infolge einer variierenden Strömung unter Berücksichtigung der Schiffsform und der Wassertiefe mit geringem numerischen Aufwand ermitteln. Somit erfüllen beide Verfahren die Forderungen nach einer hohen Flexibilität und einem niedrigen Zeitaufwand. Da es sich um Näherungsverfahren handelt, wurde ihre Genauigkeit mithilfe von Modellexperimenten im Windkanal überprüft. Dabei wurden die Kraft und das Moment auf den Schiffskörper bei variierendem Anströmwinkel gemessen. Der Einfluss der Wassertiefe wurde dabei ebenfalls untersucht. Es wurde eine gute Übereinstimmung zwischen den theoretisch ermittelten und gemessenen Momentenbeiwerten festgestellt. Die Übereinstimmung zwischen theoretisch ermittelten und gemessenen Querkraften sind auch zufriedenstellend. Die gemessene Kraft ist etwas höher als die berechnete. Diese Abweichung kann auf die Vernachlässigung der Erhöhung der Querwiderstandsbeiwert im Bug- und Heckbereich des Schiffes zurückgeführt werden. Eine kleinere Abweichung wird bei genauerer Ermittlung des Verlaufs des Querwiderstandsbeiwertes erreicht. Die Ermittlung ist aufgrund des Einflusses der Reynoldszahl jedoch problematisch.

Für die Durchführung der experimentellen Versuche in der Längsschlepprinne bei beschränkter Wassertiefe und seitlicher Strömung wurden durch den Einbau eines Doppelbodens und einer Einrichtung zur Erzeugung der seitlichen Strömung die notwendigen Voraussetzungen geschaffen. Die Bewegungsverläufe des frei fahrenden Modells wurden berührungslos aufgenommen und mittels Videoanalyzesystem ausgewertet.

Der Vergleich zwischen der gemessenen und mithilfe der erweiterten Bewegungsgleichungen berechneten Modellbahnen zeigt eine gute Übereinstimmung. Die Tatsache, dass beim Experiment das Modell früher die gerade Bahn verlässt als bei der Simulation, ist auf die Annahme zurückzuführen, dass das Schiff bei seiner Bewegung die Strömung nicht beeinflusst, was offensichtlich nicht der Realität voll entspricht.

Die durchgeführten Bewegungssimulationen auf einer vorgegebenen Route haben eine Erhöhung des Gierwinkels bei einer Fahrt in Strömungsrichtung und eine Verringerung bei Fahrt gegen die Strömung ergeben. Dies gilt nur, wenn die Strömung streng parallel zu der gefahrenen Route fließt. Die Simulationen in einem realen Strömungsfeld haben gezeigt, dass es bei einer Fahrt in einer Strömung schräg zu der gefahrenen Route zu einer deutlichen Erhöhung des Gierwinkels und somit zu einer deutlichen Erhöhung des Platzbedarfes kommt. Auch bei Fahrt in einer Strömung, deren Hauptrichtung gegen die Schiffsbewegung ist, kann es zur Erhöhung des Gierwinkels kommen, wenn die äußere Strömung eine Querkomponente bezüglich des schiffsfesten Koordinatensystems liefert.

Der Vergleich zwischen den Ergebnissen einer Naturmessung und einer Simulationsrechnung zeigte auch eine gute Übereinstimmung. Die Abweichungen in einigen Bereichen sind möglicherweise Folge der ungenauen Kenntnis der Strömungsverhältnisse.

7 Literatur

- Abkowitz** M. A. (1964): *Lectures on Ship Hydrodynamics- Steering and Manoeuvrability*. Hygro- og Aerodynamisk Laboratorium, Report Nr. Hy – 5, Lyngby
- Benedikt** K. (1978): *Theorie der gesteuerten Bewegung und Richtungsstabilität von Schiffen unter Windeinfluss*. Rostock, Dissertation
- Brix** J. (1993): *Manoeuvring Technical Manual*. Seehafen Verlag – Hamburg. ISBN 3- 87743-902-0
- Chislett** M. S., **Wied** S. (1985): *A Note on the Mathematical Modelling of Ship Manoeuvring in Relation to a Nautical Environment with Particular Reference to Current*. International Conference on Numerical and Hydraulic Modelling of Ports and Harbours, Birmingham England
- Clauss** G., **Lehmann** E., **Ostergart** C. (1988): *Meerestechnische Konstruktionen*. Springer-Verlag, Berlin. ISBN 3-540-18964-5
- Dettmann** Th., **Zentgraf** R. (2002): *Pegelabhängige Fahrspurberechnung in fließenden Gewässer*. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 84, Karlsruhe
- Dettmann** Th. (2003): *Rhein Engpassanalyse. Untersuchungen zu den erforderlichen Fahrrinnenbreiten zwischen der Main- und Moselmündung, Analyse fahrdynamischer Untersuchungen im Zeitraum von 1998 bis 2002*. BAW-Nr.3.04.10008.00, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
- Edwards** R. Y. (1985): *Hydrodynamic Forces on Vessels Situated in a Current*. International Conference on Numerical and Hydraulic Modelling of Ports and Harbours, Birmingham England

- El Moctar O.** (2001): *Numerische Berechnung von Strömungskräften beim Manövrieren von Schiffen*: Schriftenreihe Schiffbau / TU Hamburg-Harburg ; 611. Zugl. Dissertation. ISBN 3-89220-611-2
- Faires, J. D., Burden, R. L.** (1994): *Numerische Methoden*. Spektrum Akademischer Verlag. ISBN 3-86025-332-8
- Ferziger J., Peric M** (1996): *Computational methods for fluid dynamics*. Springer-Verlag Berlin. ISBN – 3-540-59434-5
- Gronarz A.** (1997): *Rechnerische Simulation der Schiffsbewegung beim Manövrieren unter besonderer Berücksichtigung der Abhängigkeit von der Wassertiefe*. Gesamthochschule-Universität Duisburg, Dissertation
- Gyon E., Hulin J.-P., Petit L.**, (1997): *Hydrodynamik*. Friedr. Vieweg & Sohn Braunschweig/ Wiesbaden. ISBN 3-528-07276-8
- Haak T., Krüger S.** (2004): *Propulsion Plant Models for Nautical Manoeuvre Simulations*. 3-rd International Conference on Computer und IT Applications in the maritime Industries COMPIT'04, Siguenza, May 2004
- Kijima K., Nakiri, Y.** (2004): *On the Practical Prediction Method for Ship Manoeuvrability in Restricted Water*. Transactions of the West-Japan Society of Naval Architects No. 107, March 2004. ISSN 0389-911X
- Kleinau D.** (1981): *Hydrodynamische Masse und hydrodynamisches Massenträgheitsmoment von Schiffen bei endlicher Wassertiefe*. Schiffbauforschung, 20. Jahrgang, Heft Nr.4, S. 245-304, Rostock
- Kleinau D.** (1986): *Dynamische Gierstabilität und Steuerbarkeit von Frachtschiffen bei Beschränkter Wassertiefe*. Rostock, Dissertation B
- Kolarov P., Paschen M.** (2006): *On the Mathematical Modelling of the Manoeuvring of Inland Vessels by Consideration of the Current Influence on their*

Manoeuvring Behaviour - 2nd RINA conference Coastal Ships & Inland Waterways, 15-16 March 2006, London

Korotkin A. I. (1986): *Hydrodynamische Massen vom Schiffskörper*. Sudostroene Leningrad (St. Petersburg) (in Russisch)

Korte H. (2003): *Prediction of Current Influence on Ship Motions- Linear Approach*. Presented at the Thirteen International Ship Control Systems Symposium (SCSS) in Orlando, Florida, 7-9 April 2003

Kyulevcheliev S., Georgiev S., Ivanov I. (2004): *Hydrodynamic Forces on a Ship in Steady Oblique Motion in Shallow Canal*. Paper presented at the Seventh International Conference on Marine Science Technology "Black Sea 2004", Varna

Lewis, E. V. (1989): *Principle of Navel Architecture, Second Revision, Vol. III*. The Society of Naval Architectures and Marine Engineering, Jercey City, NJ-USA

Meyer M. (1984): *Die Umströmung von Schiffen beim Einsatz von Bugstrahlrudern und derer Wirkung auf die Steuerbarkeit*. Rostock, Dissertation

Mutzke A. (1994): *Einfluss von Schiffsform, Schwimmelage und Flachwasser auf die Steuereigenschaften von Schiffen*. Schiffbauforschung, 33. Jahrgang (1994) Heft 3/4, Rostock

Nomoto K., Taguchi T., Honda K., Hirano S. (1957): *On the Steering Qualities of Ships*. Int. Shipbuild. Progr., Rotterdam, Heft 4, S. 354-370.

Oltmann P., Sharma S.D. (1984): *Simulation of Combined Engine and Rudder Maneuvers Using an Improved Model of Hull-Propeller-Rudder Interactions*. 15. ONR-Symposium, Hamburg

- Oltmann P.** (1973): *Auswertung von Bahnkurven freifahrender Schiffsmodele*. 5. Kolloquium des SFB 98, Hamburg
- Oltmann P.** (1981): *Untersuchung zum Manövrierverhalten sehr breiter Schiffe*. IfS-Bericht Nr. 409, Hamburg
- Oltmann P.** (1980): *An Investigation of Certain Scale Effects in Maneuvering tests with Ship Models*. IfS-Bericht Nr. 397, Hamburg
- Paschen M.** (1981): *Beitrag zur Voraussage von Bewegungsbahnen pelagischer Schleppnetze nach Einleitung von Schiffsmanöver*. Rostock, Dissertation A
- Paschen M., Winkel H.-J., Schröder M.,** (2003): *Sechskomponenten-Kraftmessungen an Modellen im Windkanal am Beispiel vom Windkräften am Überwasserschiff eines Tankermodells*. Schiffbauforschung, 42. Jahrgang, Heft Nr. 1 /2, Rostock
- Pavlenko V. G.** (1985): *Lastfahrzeuge für kleinen Flüsse*. Sudostroene – Leningrad (St. Petersburg), (in Russisch)
- Pershic R. J.** (1983): *Steuerbarkeit und Steuerung von Schiffen*. Sudostroene – Leningrad (St. Petersburg), (in Russisch)
- Puls D.** (1977): *Theorie und Modellexperiment bei der Voraussage gesteuerter Schiffsbewegungen*. Rostock, Dissertation B
- Puls D.** (1987): *Seemannschaft 3. Schiff und Manöver*. VEB Verlag für Verkehrswesen - Berlin. ISBN 3-344-00151-5
- Sandler M.** (2005): *Bahnregler für Binnenschiffsmodelle*, IN-Innovative Navigation GmbH. Nicht veröffentlicht
- Schmitz G.** (1961): *Anwendung der Theorie des schlanken Körpers auf die dynamische Gierstabilität und Steuerbarkeit von Schiffen*,

Wissenschaftliche Zeitschrift der Universität Rostock, 10 Mathematisch-Naturwissenschaftliche Reihe, Heft 2/3, Rostock

Schmitz G. (1980): *Hydrodynamik*. Eigenverlag der Wilhelm-Pieck-Universität Rostock

Schneekluth H. (1988): *Hydromechanik zum Schiffsentwurf*. Vorlesungen an der RWTH Aachen, H. Schneekluth, 3.Auflage, Koehler Verlag, Herford

Schreier S. (2003): *Untersuchung zur Leistungsfähigkeit einer Ostseekogge aus dem 15. Jh.* Rostock, Projektarbeit

Seif M. S., Jahanbakhsh E. (2004): *Neural Networks Model for Ship Maneuver*. 3-rd International Conference on Computer und IT Applications in the maritime Industries COMPIT'04, Siguenza, May 2004

Tupper E. (1996): *Introduction to Naval Architecture- Third Edition*. Butterworth Heinemann, Oxford. ISBN 0-7506-2529-5

Vasilev, A. V. (1989): *Steuerbarkeit von Schiffen*. Sudostoene Leningrad (St. Petersburg). ISBN 5-7355-0135-6. (in Russisch)

Wolff K. (1981): *Ermittlung der Manövriereigenschaften fünf repräsentativer Schiffstypen mit Hilfe von CPMC-Versuchen*. IfS-Bericht Nr. 412, Hamburg

Zhao, Y.-X. (1986): *Hydrodynamische Kräfte an manövrierenden Schiffen auf flachem Wasser*. IfS-Bericht Nr. 466, Hamburg

Anhang: Formeln zur Berechnung der Kraftkoeffizienten

Die nichtlinearen Anteile der Querkraft und des Momentes werden mit den folgenden Polynomen beschrieben.

$$c_y^{HC} = c_y^{\beta\beta} \beta^2 + c_y^{\Omega\Omega} \Omega^2 + c_y^{\beta\Omega} \beta\Omega + c_y^{\beta V_{Sy}} \beta + c_y^{\Omega V_{Sy}} \Omega + c_y^{V_{Sy}}$$

$$c_n^{HC} = c_n^{\beta\beta} \beta^2 + c_n^{\Omega\Omega} \Omega^2 + c_n^{\beta\Omega} \beta\Omega + c_n^{\beta V_{Sy}} \beta + c_n^{\Omega V_{Sy}} \Omega + c_n^{V_{Sy}}$$

Die Koeffizienten werden nach jedem Zeitschritt mit den folgenden Formeln berechnet.

$$c_y^{\beta\beta} = \frac{1}{A_L} \int_L C_w(x) T(x) \operatorname{sgn} \left(\beta - \frac{x}{L} \Omega + \frac{V_{Sy}(x)}{V} \right) dx$$

$$c_y^{\Omega\Omega} = \frac{1}{A_L} \int_L C_w(x) T(x) \frac{x^2}{L^2} \operatorname{sgn} \left(\beta - \frac{x}{L} \Omega + \frac{V_{Sy}(x)}{V} \right) dx$$

$$c_y^{\beta\Omega} = \frac{1}{A_L} \int_L C_w(x) T(x) \left(-2 \frac{x}{L} \right) \operatorname{sgn} \left(\beta - \frac{x}{L} \Omega + \frac{V_{Sy}(x)}{V} \right) dx$$

$$c_y^{\beta V_{Sy}} = \frac{1}{A_L} \int_L C_w(x) T(x) 2 \frac{V_{Sy}(x)}{V} \operatorname{sgn} \left(\beta - \frac{x}{L} \Omega + \frac{V_{Sy}(x)}{V} \right) dx$$

$$c_y^{\Omega V_{Sy}} = \frac{1}{A_L} \int_L C_w(x) T(x) \left(-2 \frac{x}{L} \frac{V_{Sy}(x)}{V} \right) \operatorname{sgn} \left(\beta - \frac{x}{L} \Omega + \frac{V_{Sy}(x)}{V} \right) dx$$

$$c_y^{V_{Sy}} = \frac{1}{A_L} \int_L C_w(x) T(x) \left(\frac{V_{Sy}}{V} \right)^2 \operatorname{sgn} \left(\beta - \frac{x}{L} \Omega + \frac{V_{Sy}(x)}{V} \right) dx$$

Die Momentenkoeffizienten ergeben sich indem das jeweilige Integral für die Kraftkoeffizienten mit x/L multipliziert wird.

LEBENS LAUF

Name : Petre K o l a r o v
Geburtstag : 28.06.1976
Geburtsort : Varna, Bulgarien
Staatsangehörigkeit : bulgarisch



Ausbildung : 1983-1990 Grundschule Nr. 7 - Varna
1990-1995 Technische Schule für Maschinenbau
- Varna (Abitur)
1995-1998 Technische Universität - Varna
Schiffbau fakultät (Vordiplom)
1998-2002 Universität Rostock,
Vertiefungsrichtung
Schiffbau/Schiffstheorie (Diplom)
Seit 2002 Promotionsstudium an der Universität
Rostock.

Praktische Erfahrung : 10.1999-02.2000 Praktikum an der Kvaerner
Warnow-Werft Rostock

2000-2002 Tätigkeit und Projektarbeit in MTE-
Meerestechnik Engineering - Wismar (Entwicklung
von schiffbaulichen Systemen)

Seit Mai 2002 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am
Lehrstuhl für Meerestechnik an der Universität
Rostock

Wissenschaftliche Arbeiten: Nachrechnung der Umströmung einer speziellen
Windabweiser-Konstruktion (Diplomarbeit)

Veröffentlichungen : KOLAROV P., 'Manoeuvrability of ships in current' -
DEMaT'03 Rostock, 2003.

KOLAROV P., SCHREIER S., 'Manoeuvrability of
Inland Vessels by Consideration of the Current
Influence on their Manoeuvring Behaviour' - *2nd
International Congress on Mechanical Engineering
and Marine Industry MEEMI 2005 Varna, Bulgaria,
2005.*

KOLAROV T., TODOROVA M., KOLAROV P., 'A Method for Determination of the Added Mass of Floating Structure Motions in a Horizontal Plane' - *2nd International Congress on Mechanical Engineering and Marine Industry MEEMI 2005 Varna, Bulgaria, 2005.*

KOLAROV P., PASCHEN M., 'On the Mathematical Modelling of the Manoeuvring of Inland Vessels by Consideration of the Current Influence on their Manoeuvring Behaviour' - *2nd RINA conference Coastal Ships & Inland Waterways, London 2006.*



Zwischenbericht 3b

Projektgruppe Engpassanalyse Rhein

Stand Juni 2009

Zusammensetzung der Projektgruppe EPA

Sebastian Messing	WSA Duisburg-Rhein (Projektleitung)	
Anne Kampker	WSA Mannheim	
Bernd Schönfelder	WSA Duisburg-Rhein	
Silke Günzel	WSA Köln	
Florian Krekel	WSA Bingen	
Cornelia Thureau	WSD West	
Petra Schneider	WSD Südwest	
Rolf Zentgraf	BAW Karlsruhe	
Wolfgang Kolibabka	WSA Duisburg-Rhein	BPR Beobachter

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	7
2	Geometrische und fahrdynamische Breiten- und Tiefenanalyse.....	8
2.1	Grundlagen	8
2.2	Das hydraulisch-fahrdynamische Modell.....	8
2.3	Geometrische Engpassanalyse im Fahrinnenbereich.....	11
2.3.1	Grundlagen der Engpassidentifikation	11
2.3.2	Talweg	13
2.3.3	Freigegebene Fahrinnentiefen bei GIW 2002	14
2.3.4	Minimale Fahrinnentiefen bei GIW 2002	15
2.4	Fahrdynamische Breiten- und Tiefenanalyse für den durchgängigen Verkehr.....	18
2.4.1	Grundlagen der Engpassidentifikation	18
2.4.2	Fahrdynamische Breitenauswertung.....	19
2.4.3	Fahrdynamische Tiefenauswertung	25
2.5	Fahrdynamische Breiten- und Tiefenanalyse unter Ausnutzung von Übertiefen	32
2.5.1	Grundlagen der Engpassidentifikation	32
2.5.2	Fahrdynamische Breitenauswertung unter Ausnutzung von Übertiefen	32
2.5.3	Fahrdynamische Tiefenauswertung unter Ausnutzung von Übertiefen	34
2.6	Superposition einzelner Engpassidentifizierungen	36
2.7	Zusammenfassung der geometrischen und fahrdynamischen Breiten- und Tiefenanalyse	39
3	Ausblick	41
4	Literatur.....	42

Bildverzeichnis

Bild 1:	<i>Verkehrsflächenbedarf eines Schiffes bei einer Kreisfahrt.....</i>	<i>9</i>
Bild 2:	<i>Schleppkurvenberechnung nach dem Prinzip der Einzelpositionierung</i>	<i>10</i>
Bild 3:	<i>Berechnete Fahrspuren eines 185 m langen und 11,45 m breiten Schubverbandes am Beispiel der Strecke Rh-km 530,000 - 570,000 bei GLW 2002</i>	<i>11</i>
Bild 4:	<i>Talweg entlang der Fließstrecke in Verbindung mit kennzeichnenden Wasserspiegellagen (Niedrig- bzw. Mittelwasserbereich)</i>	<i>13</i>
Bild 5:	<i>Vergleich der maximalen Wassertiefen im Fahrrinnenbereich mit den freigegebenen Fahrrinntiefen bei GLW 2002</i>	<i>14</i>
Bild 6:	<i>Vergleich der minimalen Tiefen im Fahrrinnenbereich mit den freigegebenen Fahrrinntiefen bei GLW 2002 (Tabellenwerte in Anlage 1)</i>	<i>15</i>
Bild 7:	<i>Fehltiefen und Fehlflächen im mittleren Drittel der Fahrrinne (Tabellenwerte in Anlage 2).....</i>	<i>16</i>
Bild 8:	<i>Fehltiefen und Fehlflächen im linken Drittel der Fahrrinne (Tabellenwerte in Anlage 3).....</i>	<i>17</i>
Bild 9:	<i>Fehltiefen und Fehlflächen im rechten Drittel der Fahrrinne (Tabellenwerte in Anlage 4).....</i>	<i>17</i>
Bild 10:	<i>li.: Großmotorgüterschiff (GMS); mittig: Schubverband einreihig zweigliedrig (SV 1R 2G); re.: Schubverband zweireihig zweigliedrig (SV 2R 2G)</i>	<i>18</i>
Bild 11:	<i>li.: GMS; mittig: SV 1R 2G; re.: SV 2R 2G (nicht maßstabsgetreu)</i>	<i>18</i>
Bild 12:	<i>Berechneter Verkehrsflächenbedarf für die Begegnung zweier 185 m langer und 11,45 m breiter Schubverbände bei GLW 2002 im Vergleich zur Verkehrsfläche</i>	<i>20</i>
Bild 13:	<i>Scheinbare Breitenengstelle zwischen Rh-km 552,000 und 553,000 für die Begegnung zweier 185 m langer und 11,45 m breiter Schubverbände bei GLW 2002</i>	<i>21</i>
Bild 14:	<i>Scheinbare Breitenengstelle bei Rh-km 415,300 für die Begegnung zweier 185 m langer und 11,45 m breiter Schubverbände bei GLW 2002</i>	<i>22</i>
Bild 15:	<i>Echte Breitenengstelle zwischen Rh-km 377,000 und km 378,000 für die Begegnung zweier 185 m langer und 11,45 m breiter Schubverbände bei GLW 2002</i>	<i>23</i>
Bild 16:	<i>Ermittelte Breitenengstellen für die Begegnung zweier 185 m langer und 11,45 m breiter Schubverbände (Tabellenwerte in Anlage 5)</i>	<i>24</i>
Bild 17:	<i>Ermittelte Breitenengstellen für die Begegnung zweier 185 m langer und 22,90 m breiter Schubverbände (Tabellenwerte in Anlage 6)</i>	<i>24</i>
Bild 18:	<i>Minimale Tiefenbestimmung unter den berechneten Fahrspuren bei vorgegebenen Abflussverhältnissen (Niedrig- und Mittelwasserbereich)</i>	<i>25</i>
Bild 19:	<i>Minimale Fahrspurtiefen für die Talfahrt des GMS (Tabellenwerte in Anlage 7).....</i>	<i>26</i>

Bild 20:	<i>Minimale Fahrspurtiefen für die Bergfahrt des GMS (Tabellenwerte in Anlage 7).....</i>	<i>26</i>
Bild 21:	<i>Minimale Fahrspurtiefen für die Talfahrt des SV 1R 2G (Tabellenwerte in Anlage 8).....</i>	<i>27</i>
Bild 22:	<i>Minimale Fahrspurtiefen für die Bergfahrt des SV 1R 2G (Tabellenwerte in Anlage 8).....</i>	<i>27</i>
Bild 23:	<i>Minimale Fahrspurtiefen für die Talfahrt des SV 2R 2G (Tabellenwerte in Anlage 9).....</i>	<i>28</i>
Bild 24:	<i>Minimale Fahrspurtiefen für die Bergfahrt des SV 2R 2G (Tabellenwerte in Anlage 9).....</i>	<i>28</i>
Bild 25:	<i>Exemplarische Darstellung der Überlagerung der Fahrspuren für die Talfahrt und Bestimmung der minimalen Tiefen bei vorgegebenen Abflussverhältnissen ...</i>	<i>29</i>
Bild 26:	<i>Überlagerter Talfahrt-Bergfahrt-Fahrspurbereich am Braubacher Grund bei GIW 2002</i>	<i>29</i>
Bild 27:	<i>Minimale Fahrspurtiefen überlagert für die Talfahrt (Tabellenwerte in Anlage 10).....</i>	<i>30</i>
Bild 28:	<i>Minimale Fahrspurtiefen überlagert für die Bergfahrt (Tabellenwerte in Anlage 10).....</i>	<i>31</i>
Bild 29:	<i>Minimale Fahrspurtiefen überlagert für die kombinierte Tal- und Bergfahrt (Tabellenwerte in Anlage 11).....</i>	<i>31</i>
Bild 30:	<i>Vergleich der Begegnung zweier 185 m langer und 22,90 m breiter Schubverbände für eine Normalabladung und bei übergroßem Tiefgang (Kändelfahrt)</i>	<i>33</i>
Bild 31:	<i>SV 2R 2G-Talfahrt: Fehltiefen und Fehlflächen bei Abladung $T_{max} + 20$ cm (Tabellenwerte in Anlage 12).....</i>	<i>34</i>
Bild 32:	<i>SV 2R 2G-Bergfahrt: Fehltiefen und Fehlflächen bei Abladung $T_{max} + 20$ cm (Tabellenwerte in Anlage 12).....</i>	<i>34</i>
Bild 33:	<i>Beispiel eines identifizierten Engpassbereichs aufgrund berechneter Fahrspuren für SV 2R 2G bei GIW (Abladung $max + 20$ cm).....</i>	<i>35</i>
Bild 34:	<i>Engpassidentifizierung; geometrische Fahrrinnenanalyse (abschnittsweise Darstellung siehe Anlage 13)</i>	<i>36</i>
Bild 35:	<i>Engpassidentifizierung; fahrdynamische Tiefenanalyse, durchgängiger Verkehr bei GIW 2002 (abschnittsweise Darstellung siehe Anlage 14).....</i>	<i>37</i>
Bild 36:	<i>Engpassidentifizierung; fahrdynamische Tiefenanalyse, Übertiefe bei GIW 2002 (abschnittsweise Darstellung siehe Anlage 15).....</i>	<i>38</i>
Bild 37:	<i>Superposition ausgewählter Engpassidentifizierungen (abschnittsweise Darstellung siehe Anlage 16)</i>	<i>39</i>

Tabellenverzeichnis

<i>Table 1: Modellabschnitte und Stand der eingebauten Peildaten</i>	<i>12</i>
<i>Table 2: Freigegebene Fahrrinntiefen bei GLW 2002</i>	<i>12</i>
<i>Table 3: Abmessungen der untersuchten Schiffstypen</i>	<i>19</i>
<i>Table 4: Wassertiefen zur Engpassidentifizierung des durchgängigen Verkehrs</i>	<i>19</i>
<i>Table 5: Fahrspurtiefen zur Engpassidentifizierung unter Ausnutzung von Übertiefen</i>	<i>32</i>

1 Vorwort

Der vorliegende Zwischenbericht 3b versteht sich als 2. Teil zu dem bereits im Juni 2007 vorgelegten Zwischenbericht 3a [2] der Projektgruppe Engpassanalyse Rhein (EPA).

Im Zwischenbericht 3a [2] wurden mittels der fünf in den vorangegangenen Zwischenberichten 1 und 2 [1] erarbeiteten Analysemethoden,

- der geometrischen und fahrdynamischen Breiten- und Tiefenanalyse (Kapitel 2.1),
- der Unfallanalyse (Kapitel 2.2),
- der Befragung Schifffahrtstreibender (Kapitel 2.3),
- der Analyse des Streckenverlaufs (nautisch schwierige Strecke, Kapitel 2.4)
- und der Analyse der Kreuzungsbauwerke (Kapitel 2.5)

potenzielle Engpässe am frei fließenden Rhein identifiziert. Eine erste, vorläufige Gesamtübersicht gibt die Zusammenfassung der Analyseergebnisse in Kapitel 2.6.

Da sich die o.g. geometrische und fahrdynamische Breiten- und Tiefenanalyse zunächst nur auf die Pilotstrecke zwischen Mainz und Koblenz beschränkte und sich die Datengrundlage für die Unfallanalyse im Sommer 2007 entlang der gesamten Untersuchungsstrecke noch sehr inhomogen darstellte, wurde im Oktober 2007 zwischen der Projektgruppe und dem Auftraggeber KOZAR (Koordinierungsgruppe für Zukunftsaufgaben am Rhein) vereinbart, dass zunächst die geometrische und fahrdynamische Breiten- und Tiefenanalyse auf die gesamte Strecke ausgedehnt und die Unfallanalyse nach Aufarbeitung der Datengrundlage sowie der Weiterentwicklung der Analysemethoden mittels RISE (Rhein-Informationssysteme) wiederholt werden soll, bevor das Projekt in die Abschlussphase übergeleitet werden kann.

Während die geometrische und fahrdynamische Breiten- und Tiefenanalyse in den Jahren 2008 und 2009 von der BAW Karlsruhe aufgearbeitet werden konnte, konnte die Unfallanalyse aus organisatorischen und datentechnischen Gründen im gleichen Zeitraum nicht abschließend bearbeitet werden. Daher wurde im Mai 2009 zwischen der Projektgruppe EPA und KOZAR vereinbart, im Zwischenberichts 3b „nur“ die geometrische und fahrdynamische Breiten- und Tiefenanalyse darzustellen und die überarbeitete Unfallanalyse erst im Rahmen des Abschlussberichtes vorzulegen.

Eine erneute Zusammenstellung der identifizierten Engpässe erfolgt ebenfalls erst im Abschlussbericht.

2 Geometrische und fahrdynamische Breiten- und Tiefenanalyse

2.1 Grundlagen

Die Methode der geometrischen und fahrdynamischen Breiten- und Tiefenanalyse basiert auf der Anwendung hydronumerischer und fahrdynamischer Modelle und ist im 2. Zwischenbericht [1] beschrieben. Im Zwischenbericht 3a [2] wird für die Pilotstrecke am Rhein zwischen Mainz und Koblenz die Analysemethode beispielhaft angewendet. Im vorliegenden Bericht 3b wird diese Methode für den gesamten frei fließenden Rhein zwischen Iffezheim und der Niederländischen Grenze vorgestellt.

Das hydrodynamische Modell des Rheins zwischen Iffezheim und der Niederländischen Grenze [3] eignet sich zur Identifizierung von Tiefenengstellen. Die geometrische Breiten- und Tiefenanalyse wird für die ausgewiesene Fahrrinne durchgeführt, um die Tiefenverhältnisse in diesem schiffahrtsrelevanten Bereich zu bewerten.

Die fahrdynamische Modellierung eines Binnenschiffes beschreibt das Kräftegleichgewicht bei einer Kreis- bzw. Geradeausfahrt und benötigt in fließenden Gewässern die Strömungs- und Geometrieparameter des Gewässers und die Abmessungen der Schiffstypen. Durch die Koppelung des Rheinmodells mit dem fahrdynamischen Modell für Binnenschiffe entsteht das hydraulisch-fahrdynamische (HFD-) Modell [4]. Hiermit lassen sich für unterschiedliche Schiffstypen und verschiedene Wasserstände die Kurswege und die zugehörigen Breitenansprüche eines Schiffs ermitteln. Bei der fahrdynamischen Breiten- und Tiefenanalyse werden Fahrspuren mit dem HFD-Modell berechnet. Hierbei wird die gesamte nutzbare Breite des Fahrwassers nach einer bestmöglichen Fahrspur hin untersucht, so dass diese Spur gelegentlich auch außerhalb der Fahrrinne liegen kann. Eine Breitenanalyse untersucht ob die berechneten Breitenansprüche von Tal- und Bergfahrt des gleichen Schiffstyps für eine Begegnung ausreichen. Unter einer berechneten Spur werden anschließend die Tiefenverhältnisse aufgetragen und bewertet. Die Grundlagen des HFD-Modells werden im folgenden Kapitel kompakt erläutert.

Zur Unterstützung der BAW wurde das Institut für Wasser und Gewässerentwicklung der Universität Karlsruhe mit der Auswertung der geometrischen und fahrdynamischen Berechnungen hinsichtlich einer „Identifizierung potenzieller Engpässe des Rheins zwischen Iffezheim und Lobith“ [5] beauftragt. Im vorliegenden Bericht werden Ergebnisse und einzelne Passagen dieser Auswertung [5] zusammengefasst wiedergegeben.

2.2 Das hydraulisch-fahrdynamische Modell

Bei den zu untersuchenden nautischen Einheiten handelt es sich um 110 m lange Großmotorgüterschiffe (GMS), 185 m lange und 11,45 m breite einreihig zweigliedrige Schubverbände (SV 1R 2G) und 185 m lange und 22,90 m breite zweireihig zweigliedrige Schubverbände (SV 2R 2G). Die Untersuchungen wurden für die Abflüsse GLW, AZW, Hochwassermarken I (HW I) und Hochwassermarken II (HW II) durchgeführt.

Zum Einsatz kommt ein rein numerisches fahrdynamisches Verfahren, bei dem die o.g. Schiffstypen innerhalb des Flussmodells untersucht werden. Hierbei wird die Fahrdynamik mit Hilfe des Verfahrens PeTra (**P**egelabhängige **T**rassierung) abgebildet, welches die fahrdynamischen Eigenschaften einer nautischen Einheit aus der Form des eingetauchten Schiffskörpers ableitet. Dazu werden potenzialtheoretisch die hydrodynamischen Massen quer und deren Verteilung längs des Schiffes berechnet und mit deren Hilfe die Fliehkräfte während der Kurvenfahrt und die Zentripetalkräfte infolge Schräganströmung auf den Schiffskörper

ermittelt. Damit sich das Schiff auf der Kreisbahn bewegen kann, muss die Summe beider Kräfte Null ergeben.

Mit der aus dieser stationären Betrachtung resultierenden Bewegungsgleichung ist es möglich den Driftwinkel, den das Schiff in der Kurvenfahrt einnimmt, in Abhängigkeit des gefahrenen Kurvenradius, der Fahrgeschwindigkeit und Fahrtrichtung des Schiffes und der örtlichen Fließgeschwindigkeit zu bestimmen. Aus der Größe des Driftwinkels und des zugehörigen Kurvenradius kann die momentane Position des taktischen Drehpunktes des Schiffes berechnet werden. Dies ist der Punkt am Schiff, an dem die Queranströmung auf den Schiffskörper ihre Anströmrichtung wechselt. Darüber hinaus hat dieser Punkt die Eigenschaft, dass der Driftwinkel β , dessen Größe u. a. von der Position längs der Schiffsachse abhängt, im taktischen Drehpunkt Null ist. Üblicherweise wird der Driftwinkel β auf die Schiffsmittle bezogen. Innerhalb des fahrdynamischen Modells wird seine Position beschrieben, indem ein dimensionsloser Koeffizient C_f multipliziert mit der Schiffslänge l den Abstand des Punktes vom Heck angibt (siehe *Bild 1*).

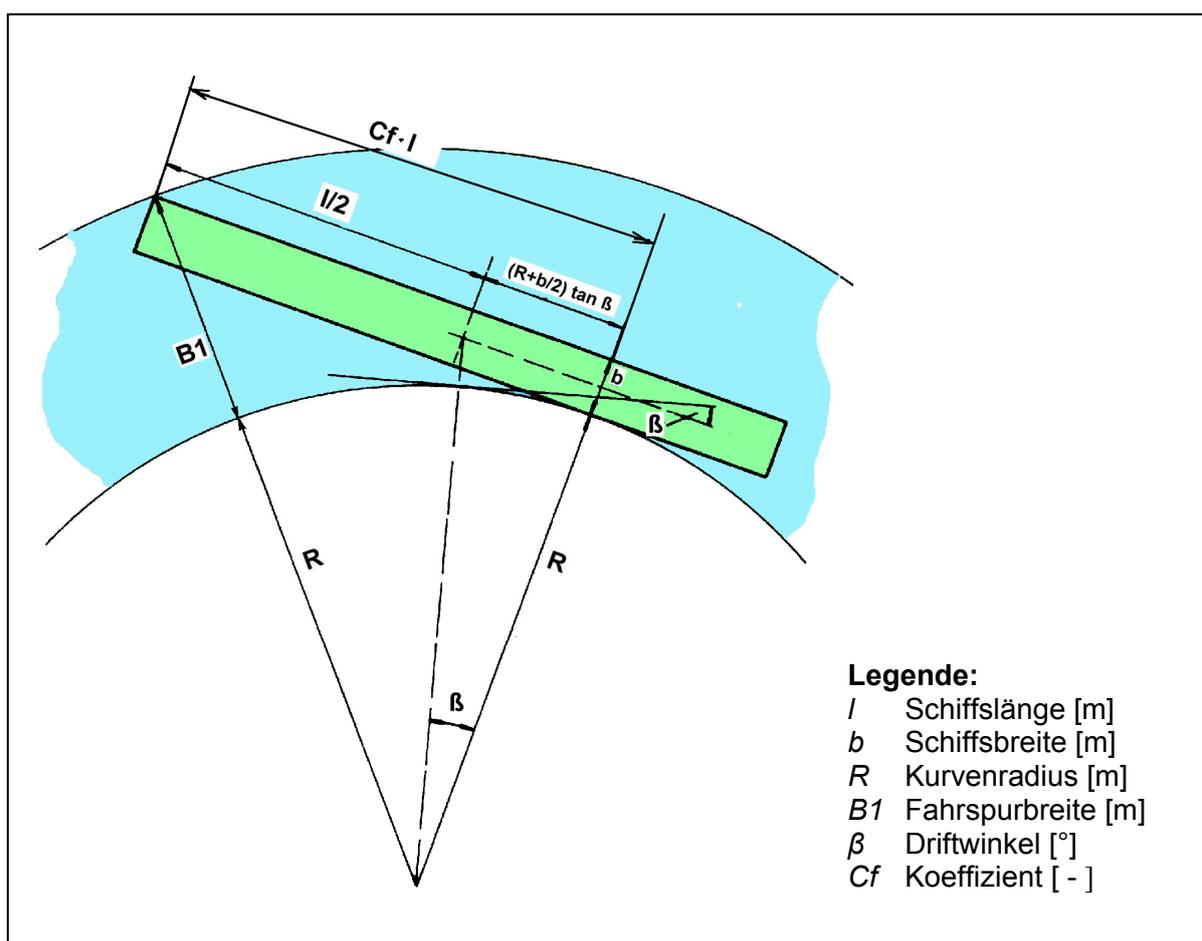


Bild 1: Verkehrsflächenbedarf eines Schiffes bei einer Kreisfahrt

Der Übergang von der Betrachtung des Driftwinkels β zum C_f -Wert bietet einen entscheidenden Vorteil. Wie erwähnt ist der Driftwinkel β an der Position des taktischen Drehpunktes immer Null. Das bedeutet, dass sich das Schiff an dieser Position immer tangential auf einer vorgegeben Kursachse bewegt. Stellt man das Schiff durch ein Rechtecksymbol dar, dessen Länge und Breite den Schiffsabmessungen entspricht und setzt man den Referenzpunkt dieses Symbols in den taktischen Drehpunkt, so erhält man bei einer dichten äquidistanten Platzierung dieses Symbols eine Schleppkurve von der Schiffsbewegung, die anzeigt, wo das Schiff fährt und wie hoch der örtliche Verkehrsflächenbedarf ist (siehe *Bild 2*).

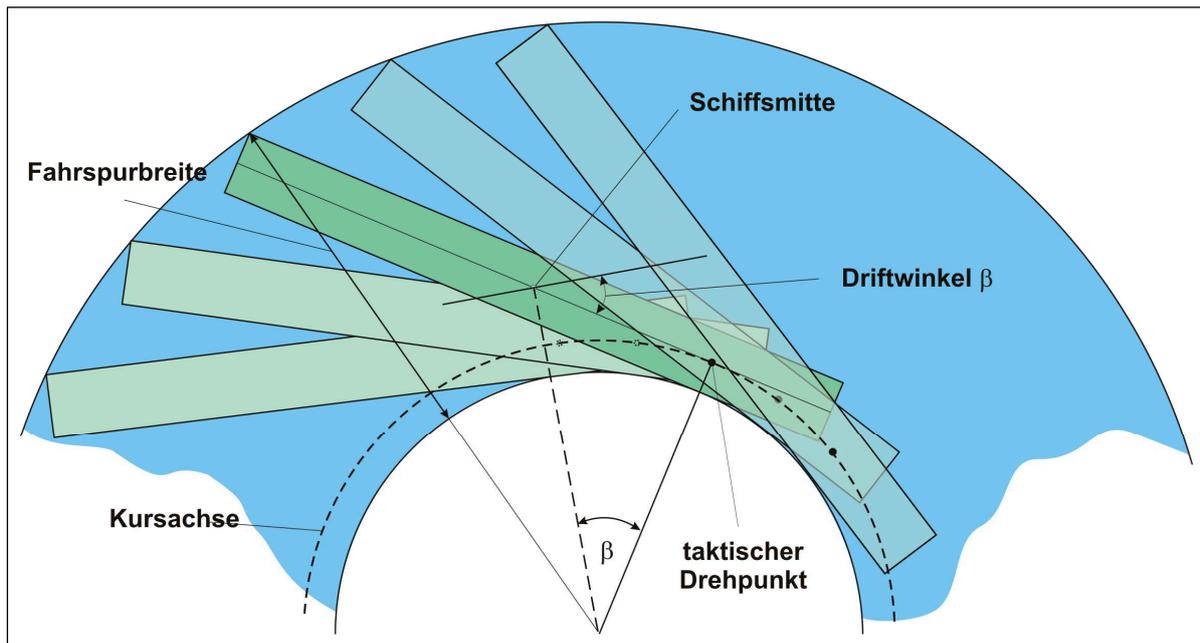


Bild 2: Schlepplkurvenberechnung nach dem Prinzip der Einzelpositionierung

Die Fahrgeschwindigkeiten wurden auf der Grundlage von aufgezeichneten Naturmessungen in der Gebirgsstrecke festgelegt. Die örtlichen Fließgeschwindigkeiten werden mit Hilfe eines Abflussmodells ermittelt, in welchem alle 100 m Querprofilgeometrien verarbeitet sind und deren Konturen mit Rauheiten belegt sind. So lassen sich neben den profilgemittelten Fließgeschwindigkeiten auch tiefengemittelte Verteilungen der Fließgeschwindigkeit berechnen.

Für die eigentliche fahrdynamische Bewertung der Strecke werden beide Modellverfahren, also das hydraulische Abflussmodell und das fahrdynamische Modell miteinander gekoppelt (HFD-Modell) [4], so dass die Informationen aus dem hydraulischen Abflussmodell während der Laufzeit des fahrdynamischen Modells PeTra zusätzlich zur Bestimmung der Fahrspurweiten für eine virtuelle Navigation genutzt werden können. Hierbei werden aus der Fließgeschwindigkeitsverteilung und der Tiefenverteilung über das Querprofil, den schiffahrtspolizeilichen Verordnungen und Sonderregeln (wie z. B. Brückendurchfahrten) Befahrbarkeitspotenziale abgeleitet. Diese können einzeln gewichtet werden und geben an, in welchen Bereichen des jeweiligen Querprofils der Fluss befahren werden sollte. Für jedes Querprofil werden aus den Befahrbarkeitspotenzialverteilungen Durchfahrtstore mit der höchsten Befahrbarkeit abgeleitet und anschließend durch die Folge von Toren Kursachsen und letztendlich Schlepplkurven konstruiert. Erst durch diesen gemeinsamen Betrieb erhält man Informationen nicht nur über den Breitenbedarf sondern auch über die Lage der Schlepplkurven innerhalb des Flussbetts.

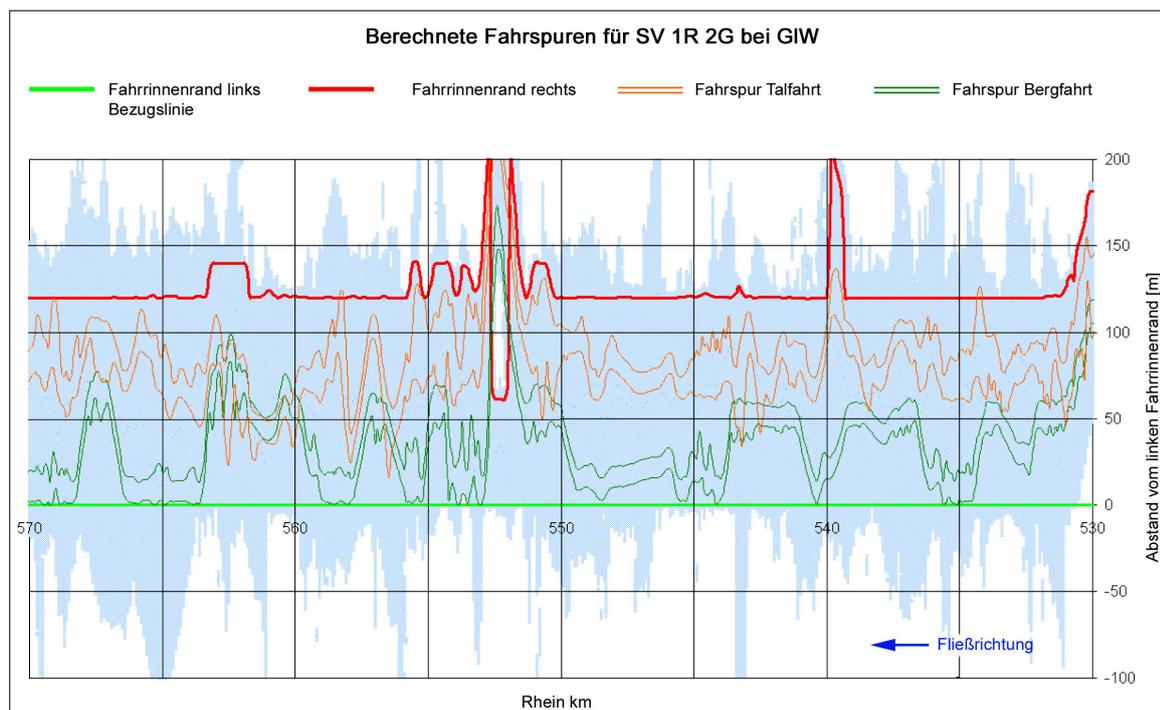


Bild 3: Berechnete Fahrspuren eines 185 m langen und 11,45 m breiten Schubverbandes am Beispiel der Strecke Rh-km 530,000 - 570,000 bei GIW 2002

In *Bild 3* wird die Fahrrinne des Rheins zwischen Bingen und St. Goar von Rh-km 530,000 bis Rh-km 570,000 gestreckt dargestellt. Alle Informationen beziehen sich auf den Abstand zum linken Fahrinnenrand. Die hellblauen Flächen zeigen das Fahrwasser an, welches den Schiffen bei einer Wassertiefe von GIW -1,90 m zur Verfügung steht. Die grünen Linien sind die Hüllkurve der Fahrspur eines zu Berg fahrenden Schubverbandes (185 m x 11,45 m) und die orangefarbenen Linien die Hüllkurven des entsprechenden zu Tal fahrenden Schubverbandes. Der Abstand der jeweils zusammengehörigen Linien zueinander zeigt die notwendige Breite im Querprofil an, die der Schubverband benötigt. Die Lage der Hüllkurven zeigt, wo der Schubverband unter Berücksichtigung der Vorgaben fahren kann und welche Verkehrsfläche hierzu benötigt wird.

2.3 Geometrische Engpassanalyse im Fahrinnenbereich

2.3.1 Grundlagen der Engpassidentifikation

Die geometrische Tiefenanalyse des frei fließenden Rheins von Iffezheim bis Lobith (Rh-km 336,210 - 865,500) basiert auf dem in der *Tabelle 1* dargestellten Stand der Profilgeometrien. Als Bezugswasserspiegellage wurde im Niedrigwasserbereich der GIW 2002 herangezogen.

Modellgebiet	Rhein-km	Peildaten
Iffezheim -Maxau	336,210 - 362,300	2000, Dez. 2001
Maxau - Speyer	362,300 - 400,600	2000
Speyer - Worms	400,600 - 443,400	2000
Worms - Mainz	443,400 - 498,300	2004
Mainz - Kaub	498,300 - 546,300	2004
Kaub - Andernach	546,300 - 613,800	2004
Andernach - Bonn	613,800 - 654,800	2000, 2004
Bonn - Köln	654,800 - 688,000	2000
Köln - Düsseldorf	688,000 - 744,200	2004
Düsseldorf - Rees	744,200 - 837,400	2004
Rees - Lobith	837,400 - 865,500	2004

Tabelle 1: Modellabschnitte und Stand der eingebauten Peildaten

Die geometrische Auswertung, bestehend aus der Bestimmung des Talwegs sowie der maximalen und minimalen Tiefen im freigegebenen Fahrrinnenbereich erfolgt über eine Länge von etwa 530 km Fließstrecke. Im Bericht werden die Ergebnisse immer über die Gesamtstrecke dargestellt.

Bei der geometrischen Auswertung der maximalen und minimalen Tiefen im freigegebenen Fahrrinnenbereich sind die streckenabhängigen ausgewiesenen Fahrrinntiefen von Bedeutung. Die *Tabelle 2* zeigt die sich streckenabhängig ändernden Fahrrinntiefen bezogen auf den GIW 2002. Die farblichen Markierungen wiederholen sich bei der tabellarischen Identifikation der potenziellen Tiefen-Engpässe in den Anlagen.

Rhein-km		Fahrrinntiefe bei GIW 2002 [m]
von	bis	
334,000	508,000	-2,10
508,000	557,000	-1,90
557,000	592,200	-2,10
592,200	865,500	-2,50

Tabelle 2: Freigegebene Fahrrinntiefen bei GIW 2002

Seit 2006 ist die Fahrrinne Rh-km 763,000 - 868,000 auf GIW -2,80 m freigegeben. Da die Grundlagen des HN-Modells aber noch auf der Peilung 2004 beruhen, wird dieser Strecke der GIW -2,50 m zugrunde gelegt.

2.3.2 Talweg

Der Talweg ist die lineare Verbindung der tiefsten Punkte benachbarter Querprofile. In Kombination mit Wasserspiegellagen erhält man einen guten Überblick der Gefälleverhältnisse von Wasserspiegel und Sohle entlang einer Fließstrecke (siehe *Bild 4*).

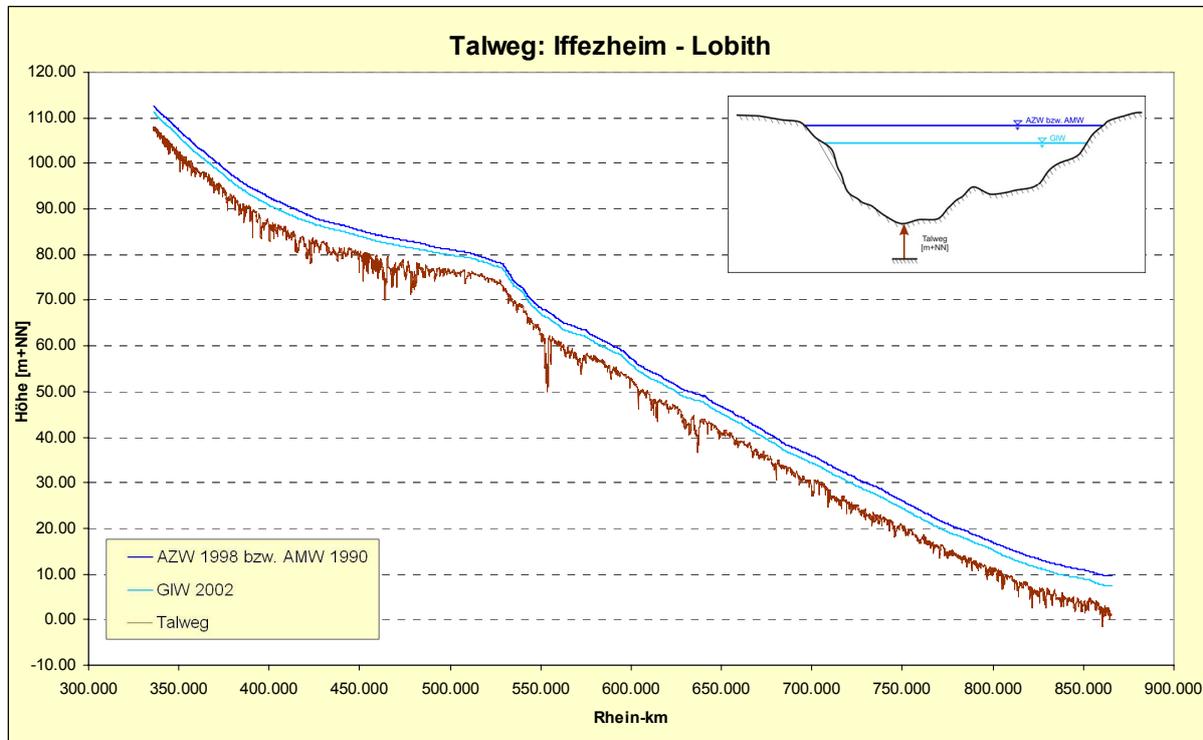


Bild 4: Talweg entlang der Fließstrecke in Verbindung mit kennzeichnenden Wasserspiegellagen (Niedrig- bzw. Mittelwasserbereich)

Aufgrund des natürlichen Gefälles eines Flusses lassen sich in dieser Darstellung die Tiefenverhältnisse nur schwer bewerten. Bezieht man die Tiefe auf den Wasserspiegel, indem man die Differenz Talweg minus Wasserspiegel wählt, so erhält man eine in die Waagrechte transformierte Darstellung der Tiefenverhältnisse entlang der Fließstrecke. Diese Form der Darstellung wird in diesem Bericht für die weiteren untersuchten Fälle gewählt (siehe nachfolgende Bilder).

2.3.3 Freigegebene Fahrrinntiefen bei GIW 2002

Da der Talweg keine Aussage über die für die Schifffahrt nutzbare Tiefe enthält, wird die Art der Betrachtung auf den Bereich der ausgewiesenen Fahrrinne angewandt. Die Differenz der tiefsten Punkte im Fahrrinnenbereich zur Bezugswasserspiegellage (GIW 2002) verdeutlicht die Tiefenverhältnisse entlang einer Fließstrecke. Zusätzlich sind die für die Schifffahrt freigegebenen Tiefen bei GIW 2002 dargestellt (siehe *Bild 5*).

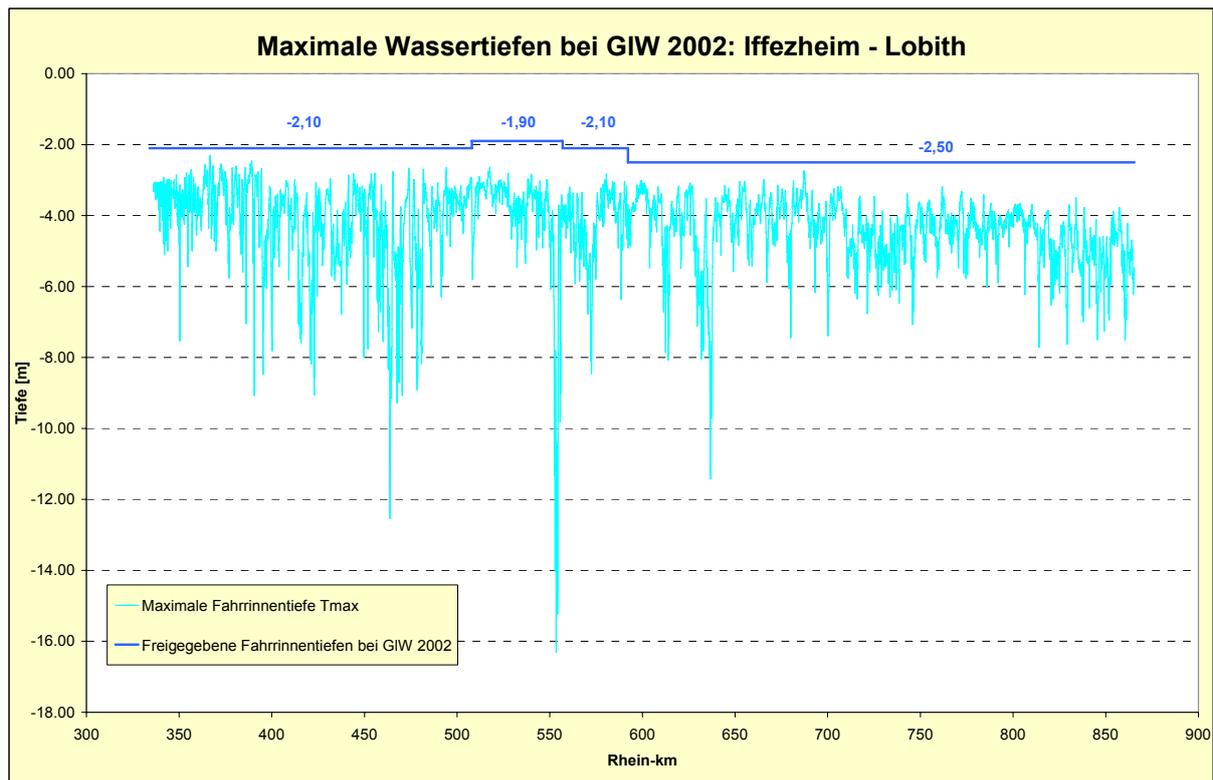


Bild 5: Vergleich der maximalen Wassertiefen im Fahrrinnenbereich mit den freigegebenen Fahrrinntiefen bei GIW 2002

2.3.4 Minimale Fahrrinntiefen bei GIW 2002

Gesamte Fahrrinnenbreite

Um Tiefen-Engpässe entlang einer Fließstrecke zu erkennen, werden die Tiefen im Bereich der freigegebenen Fahrrinne betrachtet. Vergleicht man die minimalen Tiefen im Fahrrinnenbereich mit den freigegebenen Tiefen bei GIW 2002, können Bereiche, welche die geforderten Tiefen nicht in der gesamten Fahrrinnenbreite erreichen, somit identifiziert werden (siehe Bild 6).

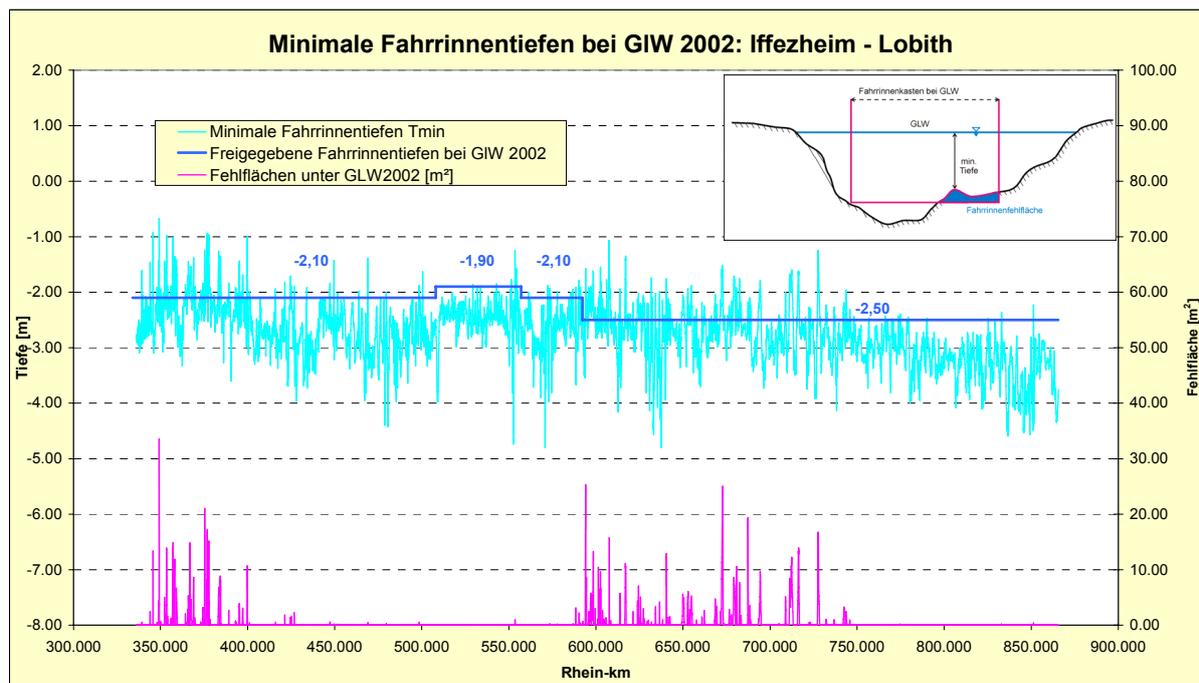


Bild 6: Vergleich der minimalen Tiefen im Fahrrinnenbereich mit den freigegebenen Fahrrinntiefen bei GIW 2002 (Tabellenwerte in Anlage 1)

Um eine Wertung der Fehltiefen zu erleichtern, wird zusätzlich auf die rechte Achse bezogen die entsprechende Fehlfläche im Fahrrinnenbereich dargestellt.

Die Analyse ergibt 730 Treffer bei einem Raster von 100 m. Dies deutet auf ca. 73 km Fehltiefen hin, was bei einer Gesamtlänge von 530 km einem Prozentsatz von 13 % entspricht. Allerdings sind hiervon 380 Treffer kleiner als 1 m² und das bei Fahrrinnenbreiten zwischen 90 m und 150 m, so dass diese Werte im Bereich der Messgenauigkeit liegen und als Engstelle nicht oder nur von sehr untergeordneter Bedeutung sind. Somit bleiben noch ca. 35 km oder 6,6 % der untersuchten Strecke als potenzielle Engpässe. Nur ca. 0,9 % der Strecke oder in der Summe ca. 5 km sind Fehlflächen mit mehr als 10 m².

Die geometrische Analyse zur Erkennung von Engpässen kann auf unterschiedliche Art verfeinert werden. Dies wird am Beispiel der Einteilung der Fahrrinne in drei Abschnitte (linkes, mittleres, rechtes Drittel) aufgezeigt.

Mittleres Drittel der Fahrrinnenbreite

Um im Vorfeld eine Wichtung der Fehltiefen und der zugehörigen Fehlflächen nach Lage in der Fahrrinne vornehmen zu können, wird die Fahrrinne virtuell in drei gleich große Breiten eingeteilt. Erfahrungsgemäß sind die meisten der Fehltiefen links und rechts der Fahrrinne und reichen unterschiedlich weit in diese hinein. An solchen Stellen ist zu überprüfen, ob eine Breitenengstelle vorliegt. Ist im mittleren Drittel der Fahrrinne die vorgegebene Tiefe nicht erreicht, so handelt es sich hier wahrscheinlich um eine schiffahrtsrelevante Engstelle (siehe *Bild 7*).

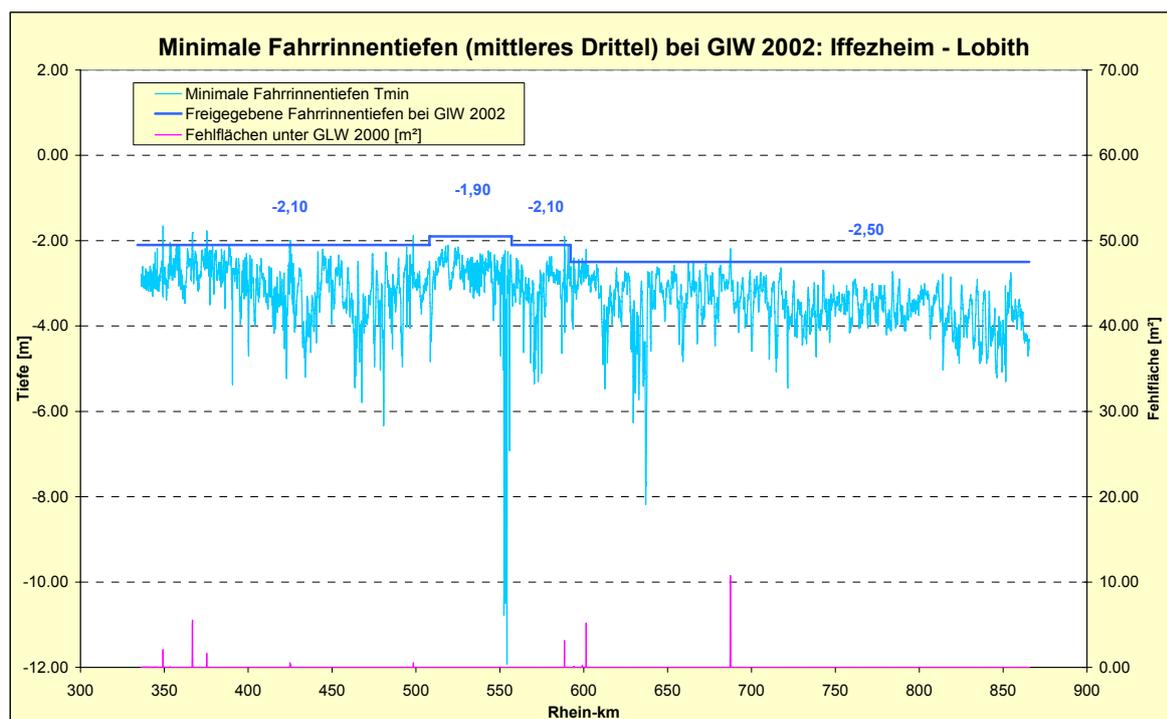


Bild 7: Fehltiefen und Fehlflächen im mittleren Drittel der Fahrrinne (Tabellenwerte in Anlage 2)

In der Summe handelt es sich um ca. 2,6 km Fehltiefen oder 0,5 % der Gesamtstrecke. Davon sind 1,5 km kleiner als 1 m². Nur im Bereich der Deutzer Platte bei Rh-km 687,300 beträgt die Fehltiefe mehr als 10 m² (Anmerkung: dieser Abschnitt basiert noch auf der Peilung 2000).

Linkes und rechtes Drittel der Fahrrinnenbreite

Die Fehltiefen mit den zugehörigen Fehlflächen im linken und im rechten Drittel der Fahrrinne sind in *Bild 8* und in *Bild 9* dargestellt.

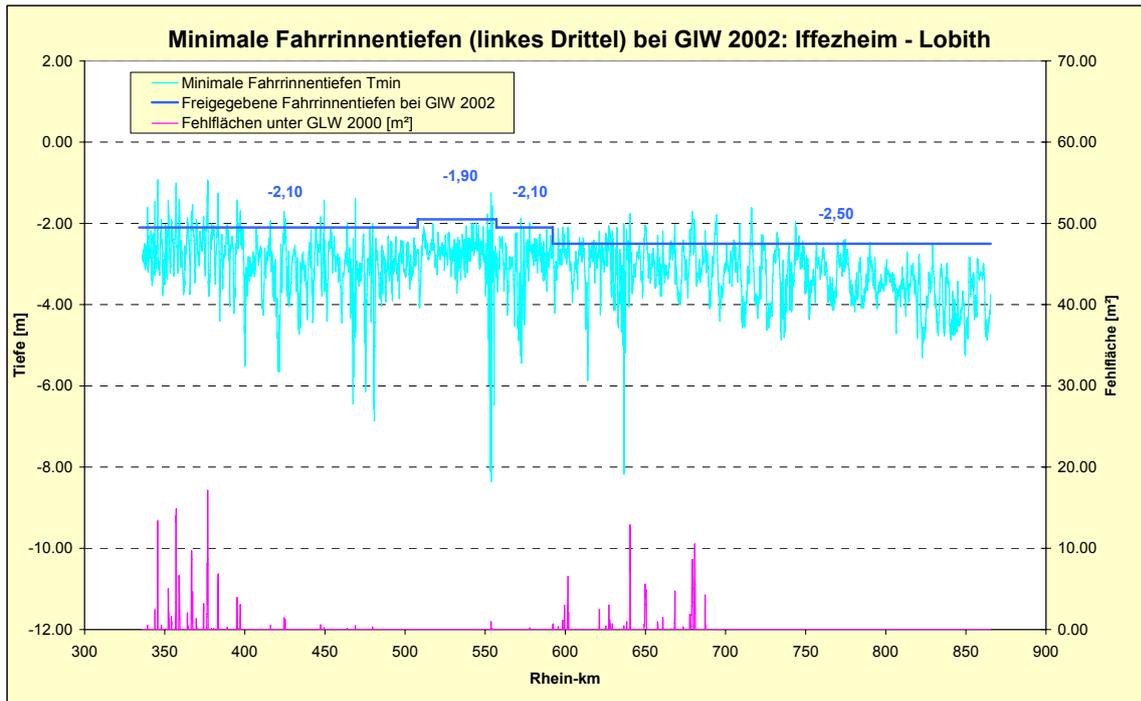


Bild 8: Fehltiefen und Fehlflächen im linken Drittel der Fahrrinne (Tabellenwerte in Anlage 3)

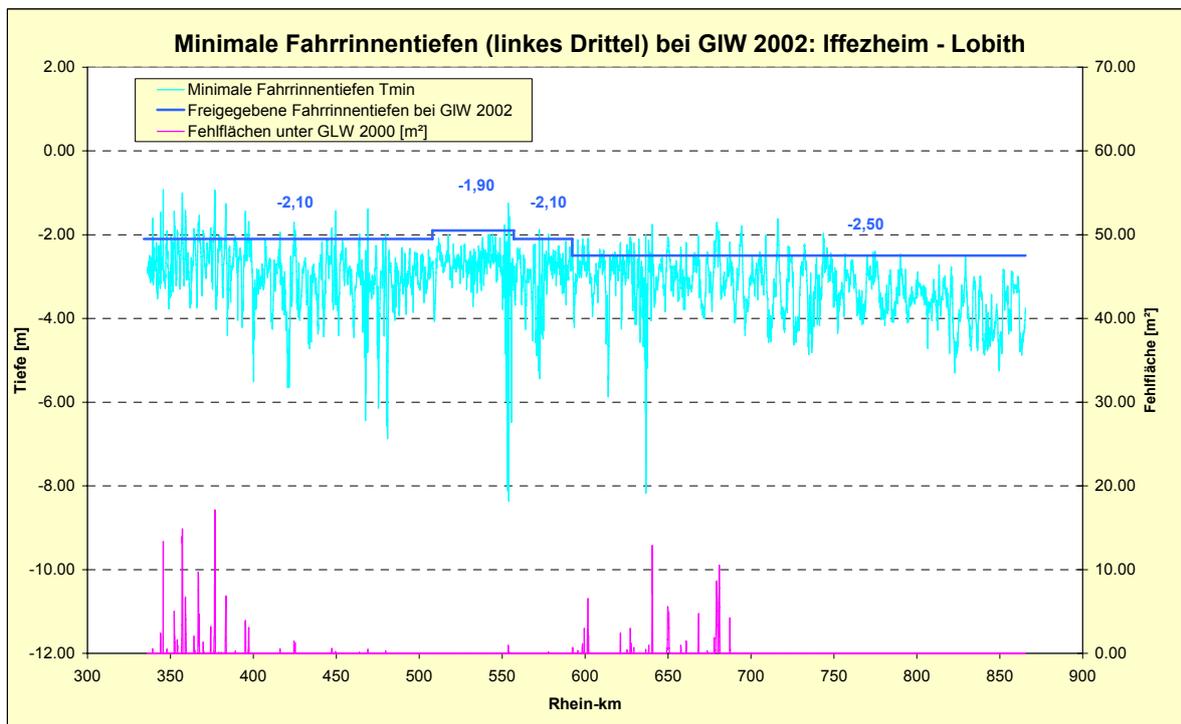


Bild 9: Fehltiefen und Fehlflächen im rechten Drittel der Fahrrinne (Tabellenwerte in Anlage 4)

In Kapitel 2.6 Superposition einzelner Engpassidentifizierungen werden die Ergebnisse der geometrischen Analyse mit den nachfolgenden Ergebnissen der fahrdynamischen Analyse (Kapitel 2.4 und 2.5) gemeinsam dargestellt und bewertet.

2.4 Fahrdynamische Breiten- und Tiefenanalyse für den durchgängigen Verkehr

2.4.1 Grundlagen der Engpassidentifikation

Die fahrdynamischen Berechnungsergebnisse der BAW zur Bestimmung der Fahrspurbreiten ausgewählter Schiffe bei unterschiedlichen Abflussverhältnissen basieren auf der Annahme der ungestörten Fahrt. Eine Beeinflussung durch Schiffsverkehr wird hierbei ausgeschlossen.

Im Rahmen einer Engpassanalyse des Rheins können wie eingangs beschrieben mit dem BAW-eigenen Programm PeTra für vorgegebene Abflussverhältnisse (im Niedrig- und Mittelwasserbereich) und Schiffstypen (Großmotorgüterschiff GMS, Schubverband einreihig zweigliedrig SV 1R 2G und Schubverband zweireihig zweigliedrig SV 2R 2G; siehe *Bild 10* und *Bild 11*) die jeweils beanspruchten Fahrspurbreiten für Berg- und Talfahrt ermittelt werden. Die Abmessungen der Schiffstypen sind in der *Tabelle 3* dargestellt.

Die fahrdynamische Betrachtung erfolgt seitens der BAW aus verfahrenstechnischen Gründen erst ab Maxau (Rh-km 352,000) und aus modelltechnischen Gründen bis zur niederländischen Grenze (Rh-km 858,100).



Bild 10: li.: Großmotorgüterschiff (GMS);
mittig: Schubverband einreihig zweigliedrig (SV 1R 2G);
re.: Schubverband zweireihig zweigliedrig (SV 2R 2G)

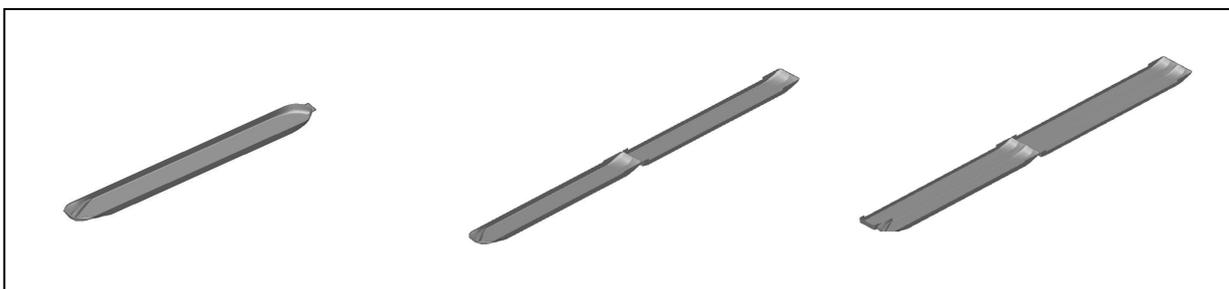


Bild 11: li.: GMS; mittig: SV 1R 2G; re.: SV 2R 2G (nicht maßstabsgetreu)

Schiffstyp	Länge [m]	Breite [m]
GMS	110	11,45
SV 1R 2G	185	11,45
SV 2R 2G	185	22,90

Tabelle 3: Abmessungen der untersuchten Schiffstypen

Für den durchgängigen Verkehr wird vorausgesetzt, dass prinzipiell ausreichende Tiefe für alle Schiffe vorherrscht. Da die Schiffe durchgehend zwischen Iffezheim und Lobith fahren sollen, sind die Abschnitte des Rheins mit den kleinsten Fahrrinntiefen abladebestimmend. Daher wird die Relation Iffezheim – Lobith mit einem vorgegebenen Tiefgang von 1,60 m für alle berechneten Kursachsen gewählt. Fahrdynamisch bedeutet dies, dass unter der Annahme eines Squats von einheitlich 20 cm und eines Flottwassers von mindestens 10 cm die verkehrsgesicherte Tiefe von GIW -1,90 m eingehalten wird. Im Bereich größerer Wassertiefen wird die nautisch günstigste Kursachse, nicht aber zwingend die tiefstmögliche Kursachse, berechnet (siehe *Tabelle 4*).

Rhein-km		Fahrrinntiefe bei GIW 2002 [m]	Tiefgang [m]	Σ Squat-/Flottwerte [m]	bewertete Wassertiefe [m]
von	bis				
334,000	508,000	-2,10	-1,60	0,30	-1,90
508,000	557,000	-1,90	-1,60	0,30	-1,90
557,000	592,200	-2,10	-1,60	0,30	-1,90
592,200	865,500	-2,50	-1,60	0,30	-1,90

Tabelle 4: Wassertiefen zur Engpassidentifizierung des durchgängigen Verkehrs

2.4.2 Fahrdynamische Breitenauswertung

Zur Feststellung etwaiger Breitenengstellen wurden die berechneten Fahrspurbreiten mit der örtlich vorhandenen Fahrrinnenbreite und darüber hinaus mit der örtlich vorhandenen Fahrwasserbreite verglichen. Für die Bearbeitung wurde festgelegt, dass eine Breitenengstelle dann auftritt, wenn sich der zu untersuchende Schiffstyp mit sich selbst im nutzbaren Fahrwasser nicht begegnen kann. Das bedeutet, die Summe der Fahrspurbreiten aus der Talfahrt und der Bergfahrt zuzüglich zu berücksichtigender Sicherheitsabstände muss größer sein als die zugehörige Fahrrinnen- bzw. Fahrwasserbreite. Nach den Erfahrungen der BAW, die während umfangreicher fahrdynamischer Naturuntersuchungen auf dem Rhein gesammelt wurden, halten die Schiffe zueinander und zu den Fahrrinnen- bzw. Fahrwasserbegrenzungen einen Sicherheitsabstand von ca. 10 m ein. In der Summe wird also ein Zuschlag von insgesamt 30 m (10 m zwischen den Schiffen und 10 m zu der jeweiligen Fahrwasserbegrenzung) berücksichtigt.

Bei der Berechnung der Fahrspurbreiten wurden einzuhaltende Mindestbreiten vorgegeben. Für die 11,45 m breiten Schiffseinheiten wurde eine Mindestbreite von 16 m und für die 22,90 m breiten Einheiten eine Mindestbreite von 30 m vorgegeben. Dies ist notwendig, um dem Schiff bei der Geradeausfahrt die notwendige Verkehrsfläche zur Verfügung zu stellen, damit notwendige Kurskorrekturmanöver durchgeführt werden können. Zur Feststellung der Breitenengstellen wurden die berechneten Fahrspurbreiten des Bergfahrers grün und des Talfahrers orange dargestellt jeweils bezogen auf ihre steuerbordseitige Fahrrinnenbegrenzung,

wobei Sicherheitsabstände zu den Fahrrinnenrändern von jeweils 10 m berücksichtigt wurden. Die hellblauen Flächen zeigen das vorhandene Fahrwasser bei einer Wassertiefe von GIW -1,90 m an (siehe *Bild 12*).

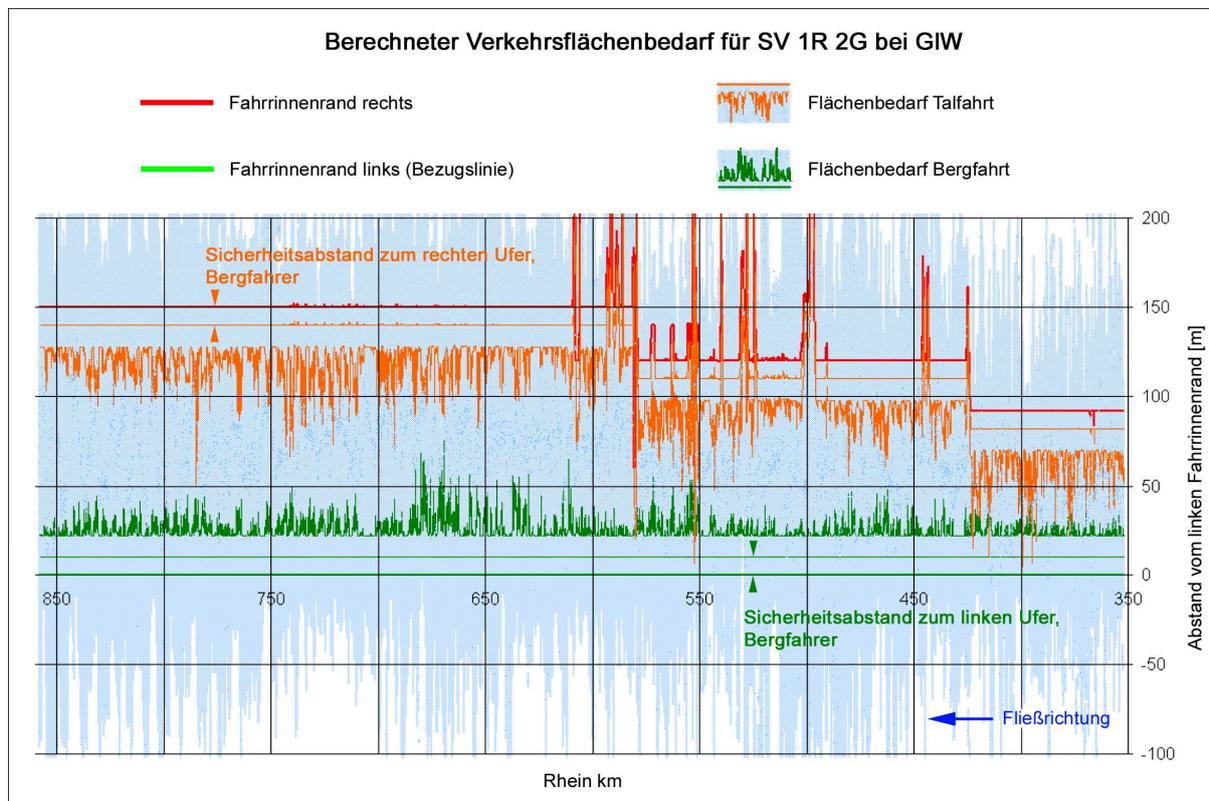


Bild 12: Berechneter Verkehrsflächenbedarf für die Begegnung zweier 185 m langer und 11,45 m breiter Schubverbände bei GLW 2002 im Vergleich zur Verkehrsfläche

Überschneiden sich die Breitenlinien des Bergfahrers mit denen des Talfahrers, ist dies ein Zeichen dafür, dass sich die Verbände nicht innerhalb der Fahrrinne begegnen können. Es ist ein Hinweis auf eine mögliche Breitenengstelle.

Diesen Hinweisen muss für die Breitenanalyse einzeln nachgegangen werden, indem die Ursachen für die Fehlbreiten ermittelt werden und überprüft wird, ob eine Begegnung im Fahrwasser möglich wäre. In den nachfolgenden Bildern sind beispielhaft drei Problemstellen dargestellt.

In *Bild 13* wird die angezeigte Breitenengstelle zwischen Rh-km 552,000 und 553,000 dargestellt: Die errechneten Bewegungen des zu Berg fahrenden Schubverbandes sind mit grünen und die Bewegungen des zu Tal fahrenden Schubverbandes mit orangefarbenen Symbolen eingetragen. Die grünen bzw. orangefarbenen Linien zeigen die Fahrspuren aufgezeichneter ARGO-Schiffe. Hellblaue Flächen zeigen die Wasseroberfläche, dunkelblaue Flächen die Fahrrinnenfläche an. Hier, im Bereich Geisenrücken, liegt eine Fahrrinnenteilung vor. Verfahrensbedingt werden die Fahrspurbreiten auf den linken Fahrrinnenrand bezogen und bei Fahrrinnenteilungen auf den linken Fahrrinnenarm. Beide Schiffe benutzen den rechten Fahrrinnenarm, der genügend Fläche für eine Begegnung aufweist. Es handelt sich also um eine scheinbare Breitenengstelle.

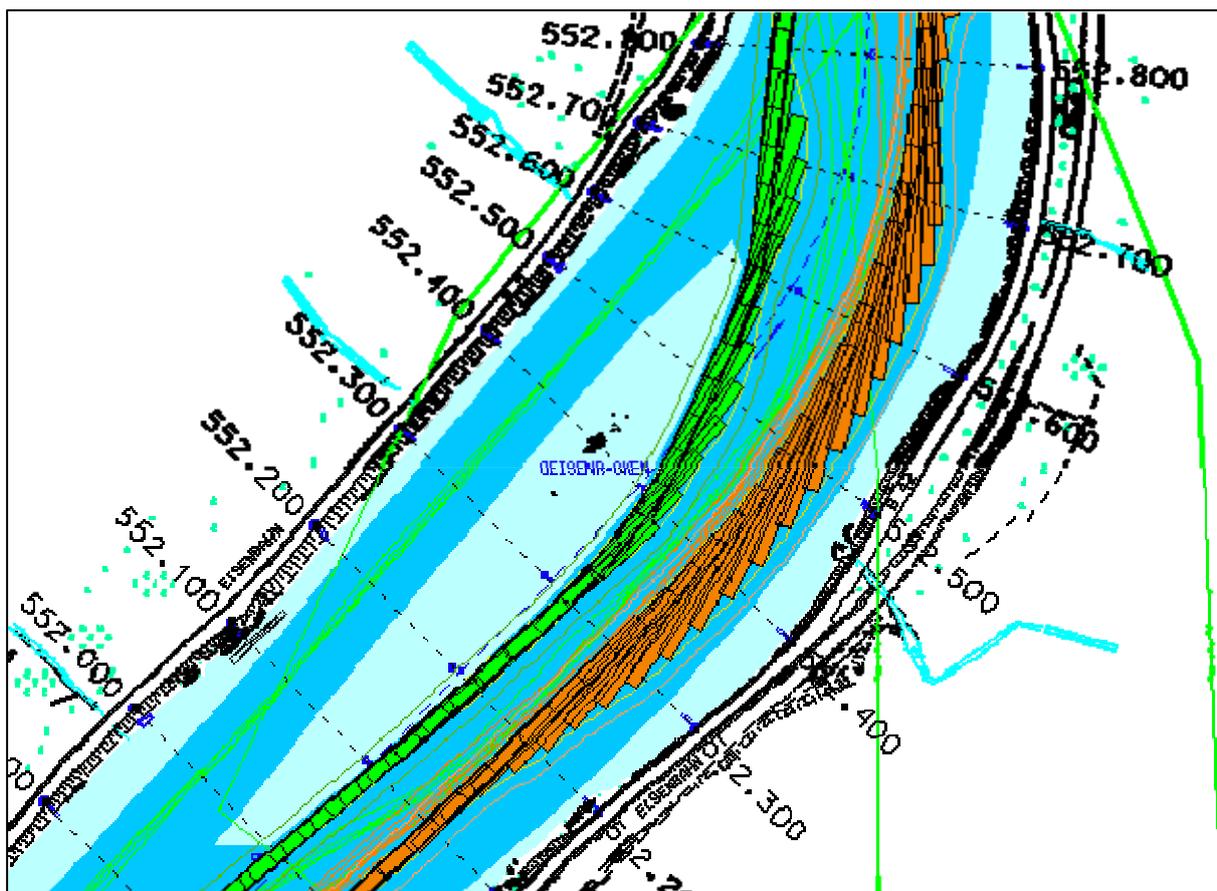


Bild 13: *Scheinbare Breitenengstelle zwischen Rh-km 552,000 und 553,000 für die Begegnung zweier 185 m langer und 11,45 m breiter Schubverbände bei GIW 2002*

Bei der ermittelten Engstelle im Bereich Braubacher Grund zwischen Rh-km 579,000 und 581,000 verhält es sich entsprechend, da auch hier eine Fahrrinnenteilung vorliegt, bei der allerdings jeder Verkehrsrichtung ein eigener Fahrrinnenarm zugeteilt ist. Auch hier handelt es sich um eine scheinbare Engstelle.

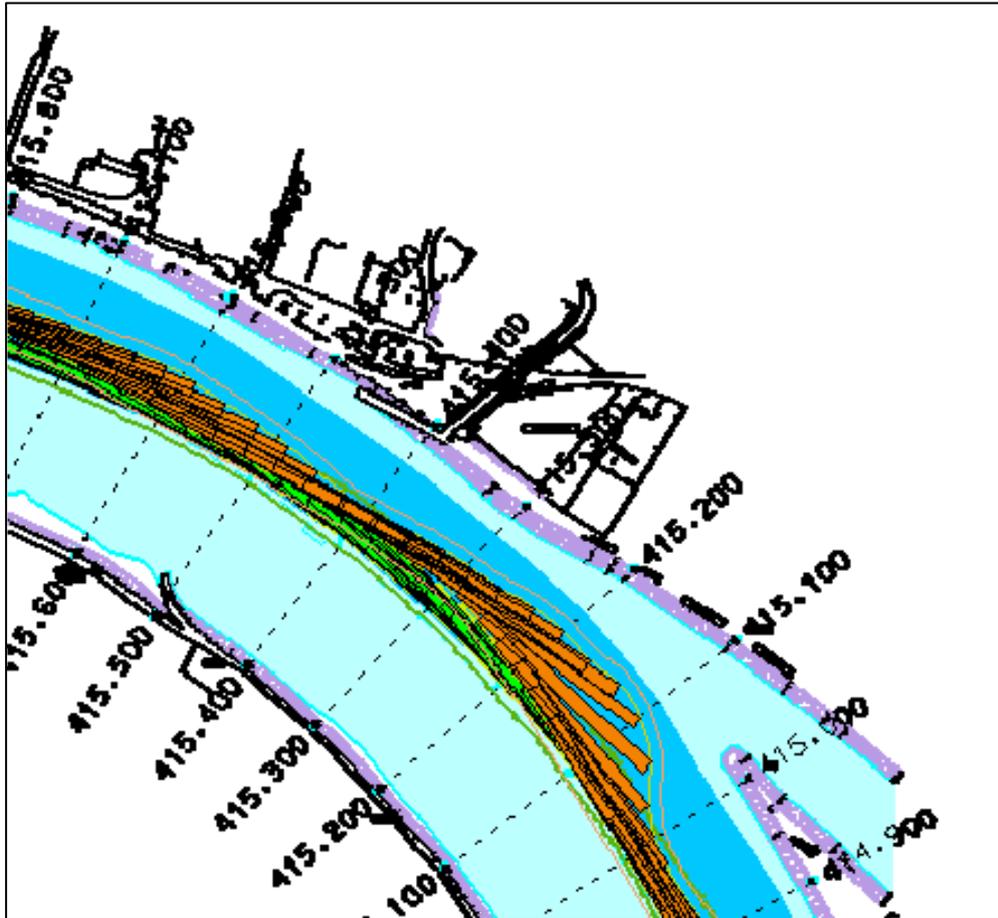


Bild 14: Scheinbare Breitenengstelle bei Rh-km 415,300 für die Begegnung zweier 185 m langer und 11,45 m breiter Schubverbände bei GlW 2002

Bei Rh-km 415,300 wird ebenfalls eine Breitenengstelle angezeigt (*Bild 14*). Wie eingangs erwähnt, wurde bei der Berechnung der Fahrspuren Gegenverkehr nicht berücksichtigt. Das bedeutet, dass beide Modellschubverbände ohne Rücksicht aufeinander den Rhein befahren und notwendige Kurskorrekturen dann durchführen, wenn es das Fahrwasser anbietet. In Anbetracht des verfügbaren Fahrwassers kann festgestellt werden, dass die Kurskorrektur an dieser Stelle nicht zwingend notwendig war. Hätte der dargestellte Talfahrer von dem Bergfahrer Kenntnis gehabt, hätte er das Kurskorrekturmanöver auch an anderer Stelle durchführen können. Auch hier handelt es sich um eine scheinbare Engstelle.

Anders verhält es sich in der Krümmung zwischen Rh-km 377,000 und 378,000 (*Bild 15*). Der zu Tal fahrende Schubverband hat sichtlich Mühe, in der vorhandenen Fahrrinne die Krümmung zu durchfahren. Auch bei einer gleichmäßigeren Durchführung der Steuermanöver könnte er die Fahrspurbreite nicht soweit reduzieren, dass eine durchgehende Begegnungsfahrt in der Fahrrinne möglich wäre. Da auch bei Berücksichtigung des Fahrwassers (die Fahrwassertiefenverteilungen der einzelnen Querprofile sind als hellbraune Linien in den Profilen dargestellt.) nicht genügend Verkehrsfläche für eine ungestörte Begegnung bereit steht, handelt es sich hier um eine echte Breitenengstelle.

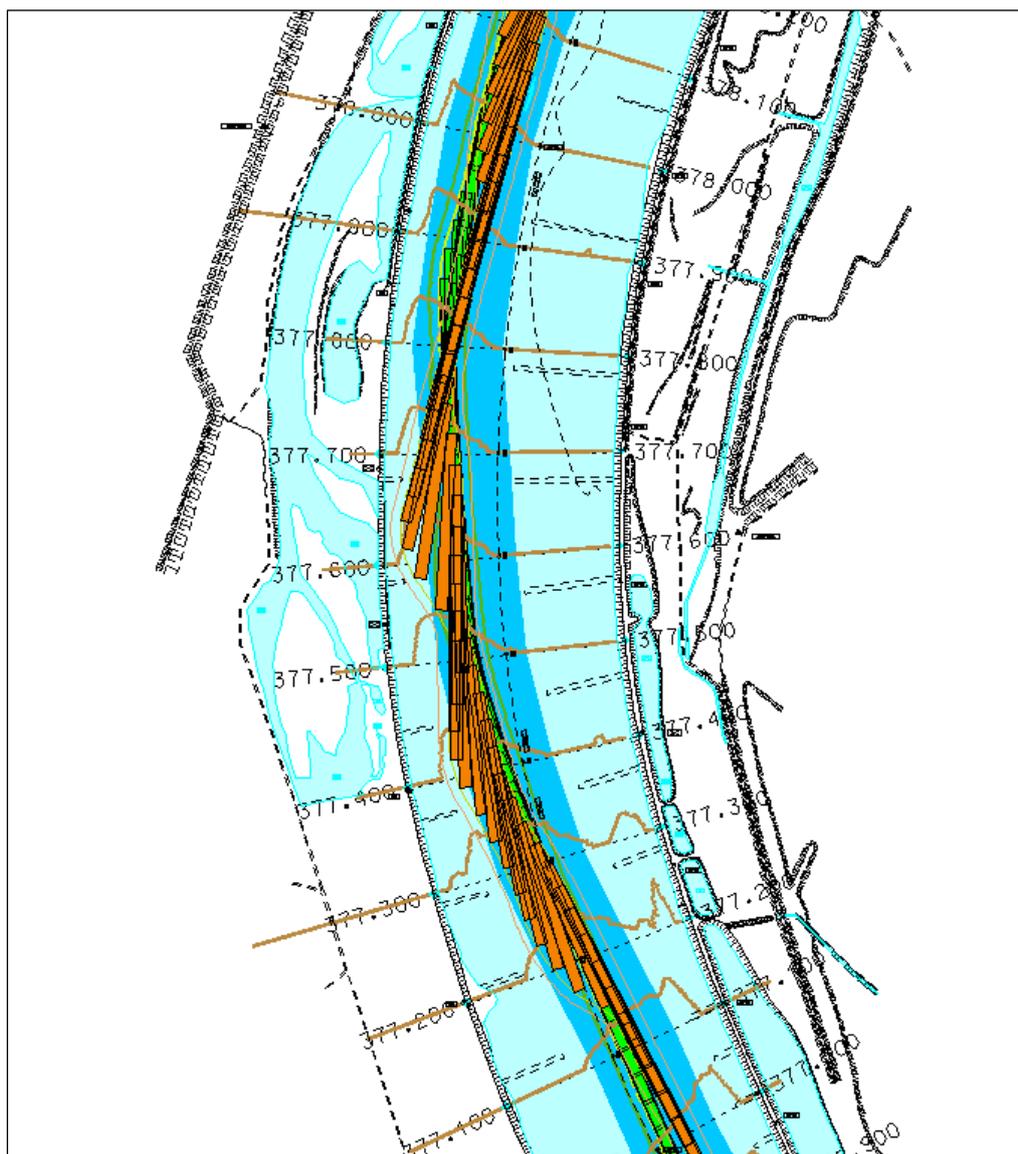


Bild 15: Echte Breitenengstelle zwischen Rh-km 377,000 und km 378,000 für die Begegnung zweier 185 m langer und 11,45 m breiter Schubverbände bei GIW 2002

Nach dieser Verfahrensweise wurden alle angezeigten Breitenengstellen einzeln betrachtet und die Ergebnisse in Tabellenform zusammengestellt. Für den Begegnungsverkehr des GMS konnten auf der gesamten Strecke des Rheins keine Breitenengstellen festgestellt werden. Für die übrigen untersuchten nautischen Einheiten sind Ergebnisse der Breitenanalysen in *Bild 16* für die Begegnung zweier SV 1R 2G und in *Bild 17* für die Begegnung zweier SV 2R 2G zusammengestellt. Die zugehörigen Tabellen mit den genauen km-Angaben zu den Breitenengstellen befinden sich in den Anlagen 5 und 6 dieses Berichts.

Die in *Bild 16* und *Bild 17* aufgeführten Engstellen sind für die Abflüsse GIW, AZW, HM1 und HM2 jeweils in einem Diagramm dargestellt. Jedes Diagramm ist in die Abschnitte 0 bis 1 (unterer Bereich) und 1 bis 2 (oberer Bereich) unterteilt. Die ermittelten Breitenengstellen beziehen sich im unteren Bereich des jeweiligen Diagramms auf die Fahrrinnenbreite. Die Farbbalken im unteren Bereich zeigen an, dass in der Fahrrinne nicht genügend Verkehrsfläche für die Begegnung zur Verfügung steht. Unter Nutzung des Fahrwassers kann jedoch immer noch eine Begegnung möglich sein. Der obere Bereich des Diagramms zeigt deshalb an, ob die Engstelle bestehen bleibt, wenn das verfügbare Fahrwasser genutzt wird.

Bleiben die Farbbalken auch im oberen Bereich bestehen, ist eine Begegnung auch im Fahrwasser mit der erforderlichen Sicherheit und Leichtigkeit nicht mehr möglich, was für das Vorhandensein einer Breitenengstelle entscheidend ist.

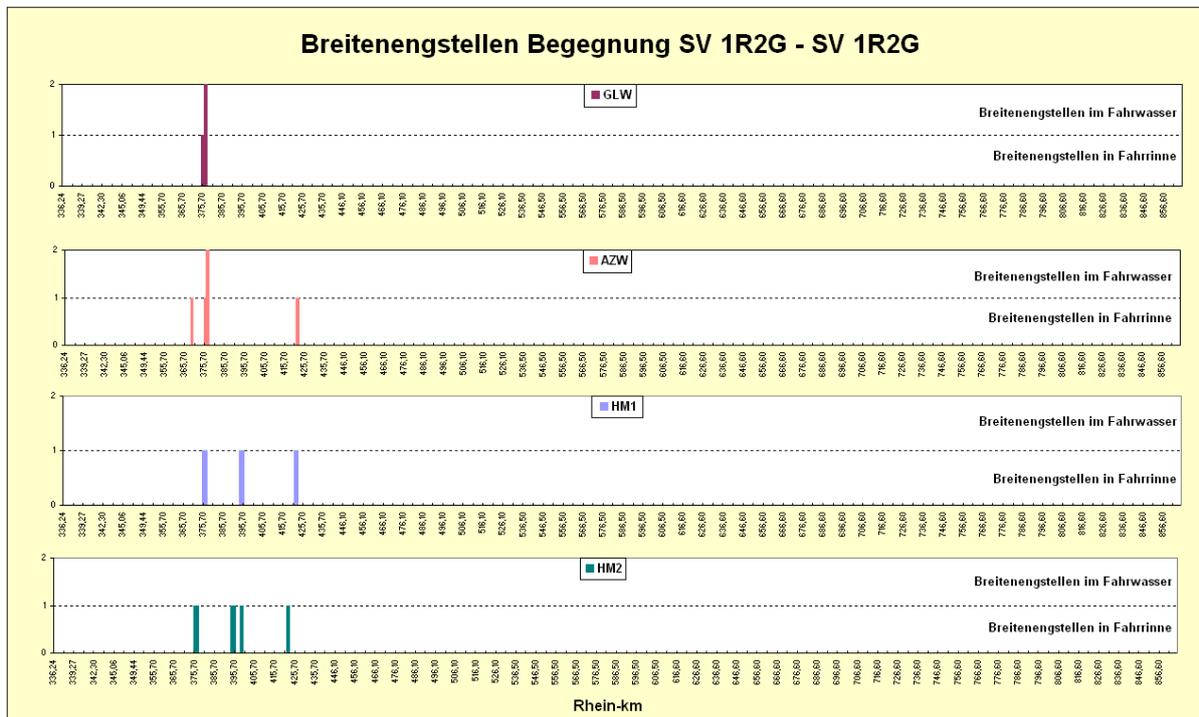


Bild 16: Ermittelte Breitenengstellen für die Begegnung zweier 185 m langer und 11,45 m breiter Schubverbände (Tabellenwerte in Anlage 5)

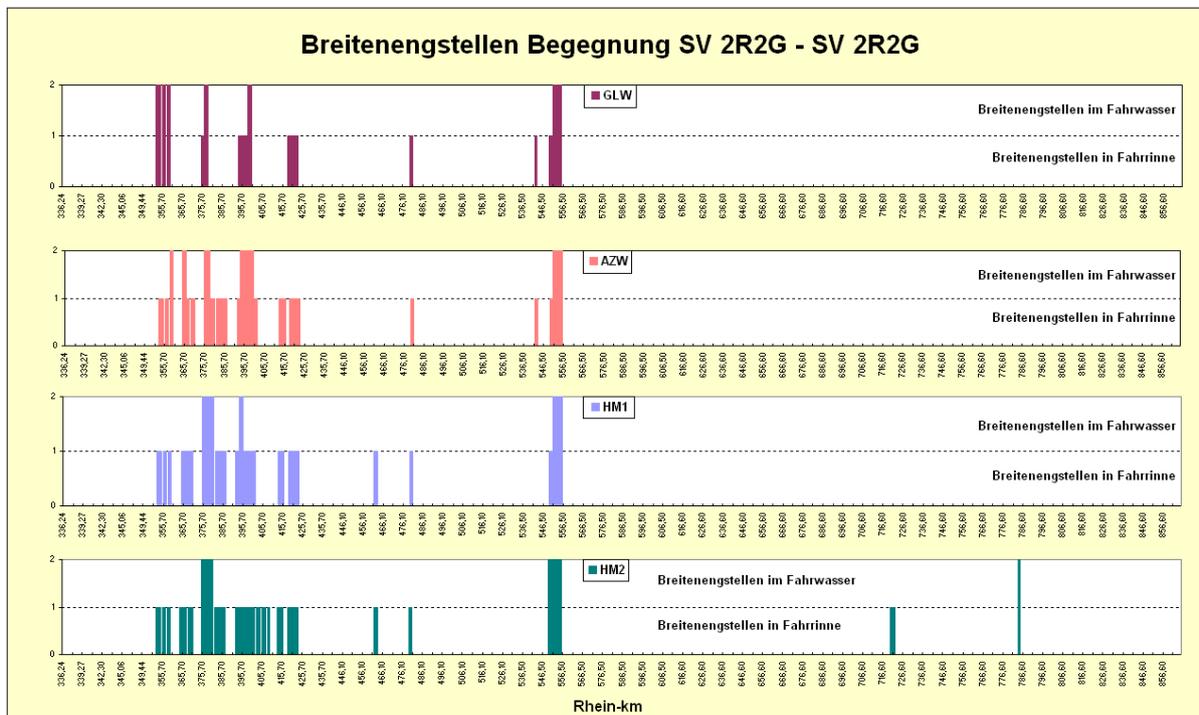


Bild 17: Ermittelte Breitenengstellen für die Begegnung zweier 185 m langer und 22,90 m breiter Schubverbände (Tabellenwerte in Anlage 6)

2.4.3 Fahrdynamische Tiefenauswertung

Der Breitenanspruch eines Schiffes wurde unter der Vorgabe errechnet, dass die Tiefe prinzipiell ausreicht. Verfahrensbedingt wird die detaillierte Tiefenanalyse in der errechneten Spur separat durchgeführt.

In diesem weiteren Schritt sind für jede berechnete Schiffspassage die minimalen Fahrspurtiefen für Berg- und Talfahrt zu ermitteln (siehe *Bild 18*), um so die verschiedenen Schiffstypen bei den unterschiedlichen Abflussverhältnissen (im Niedrigwasserbereich der GIW 2002, im Mittelwasserbereich der AZW 1998 bzw. AMW 1990) hinsichtlich einer optimalen Tiefenauslastung bewerten zu können.

Bei der folgenden Tiefenanalyse werden die Tiefen unter der berechneten Spur analysiert, auch wenn die Schiffe die ausgewiesene Fahrrinne bei Bedarf verlassen. Somit ist bei der Auswertung aller berechneten Schiffspassagen eine Bewertung der ausgewiesenen Fahrrinne möglich.

Entlang der berechneten Fahrtrouten werden die Tiefenverhältnisse der genutzten Fahrspuren aufgezeigt.

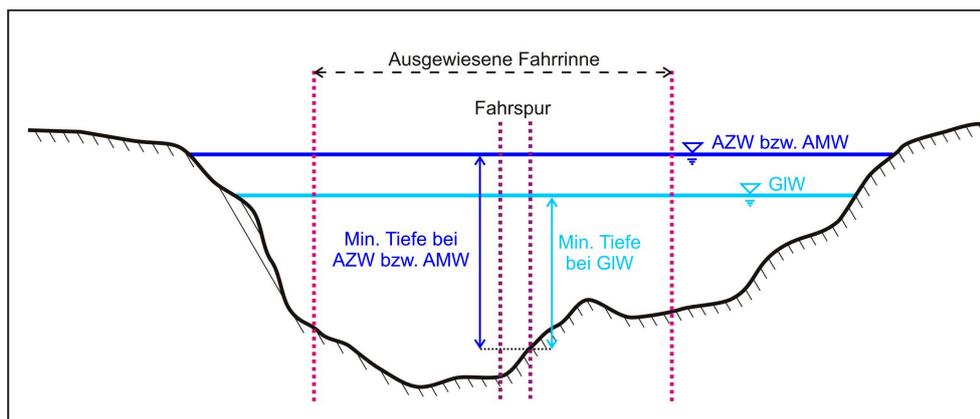


Bild 18: Minimale Tiefenbestimmung unter den berechneten Fahrspuren bei vorgegebenen Abflussverhältnissen (Niedrig- und Mittelwasserbereich)

Minimale Tiefen unter den berechneten Fahrspuren

In Abhängigkeit von Schiffstyp (GMS, SV 1R 2G und SV 2R 2G), Fahrtrichtung (Berg- und Talfahrt) und Abflussverhältnissen (Niedrig- bzw. Mittelwasser) wurden insgesamt 12 verschiedene Fahrspuren ermittelt. Auf eine Tiefenauswertung für die Abflüsse bei HW I und HW II wurde verzichtet, da hier keine Hinweise auf Tiefenengpässe erwartet werden.

GMS (Großmotorgüterschiff)

Anhand der Ergebnisse aus den fahrdynamischen Berechnungen für das GMS (L = 110 m, B = 11,45 m) werden in den beiden Diagrammen (siehe *Bild 19* und *Bild 20*) jeweils für die Tal- und Bergfahrt die minimalen Wassertiefen unter den berechneten Fahrspuren aufgeführt. Eine Auflistung der Profile, an welchen die geforderten Tiefen in der Fahrspur nicht eingehalten werden, befindet sich in der Anlage 7.

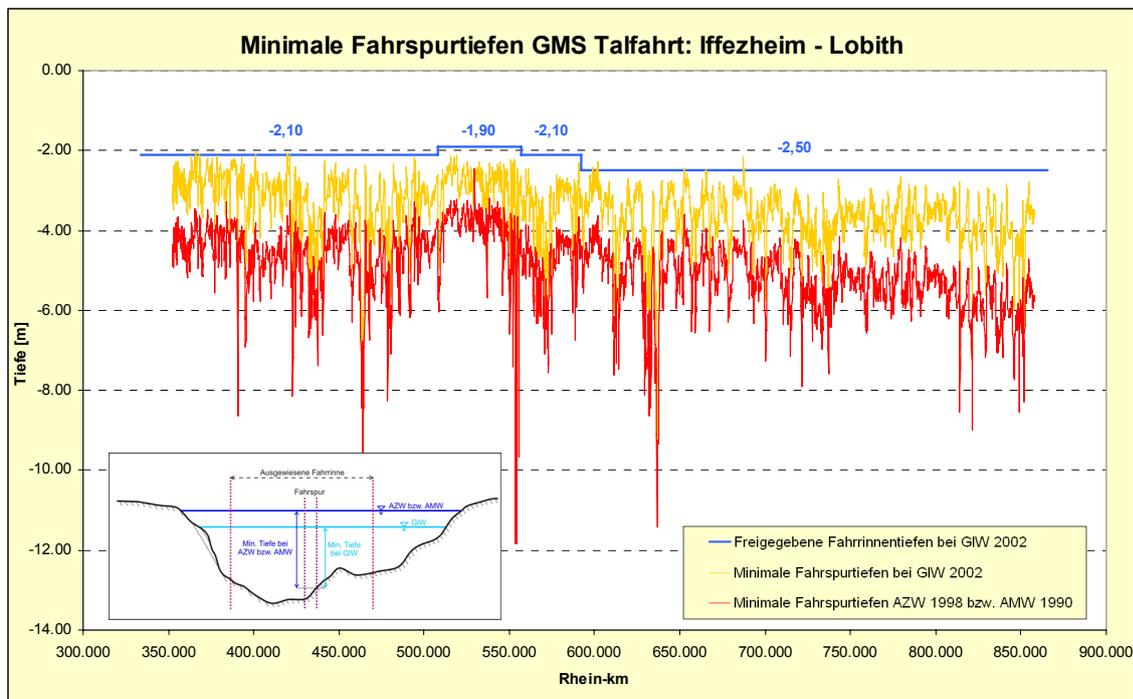


Bild 19: Minimale Fahrspurtiefen für die Talfahrt des GMS (Tabellenwerte in Anlage 7)

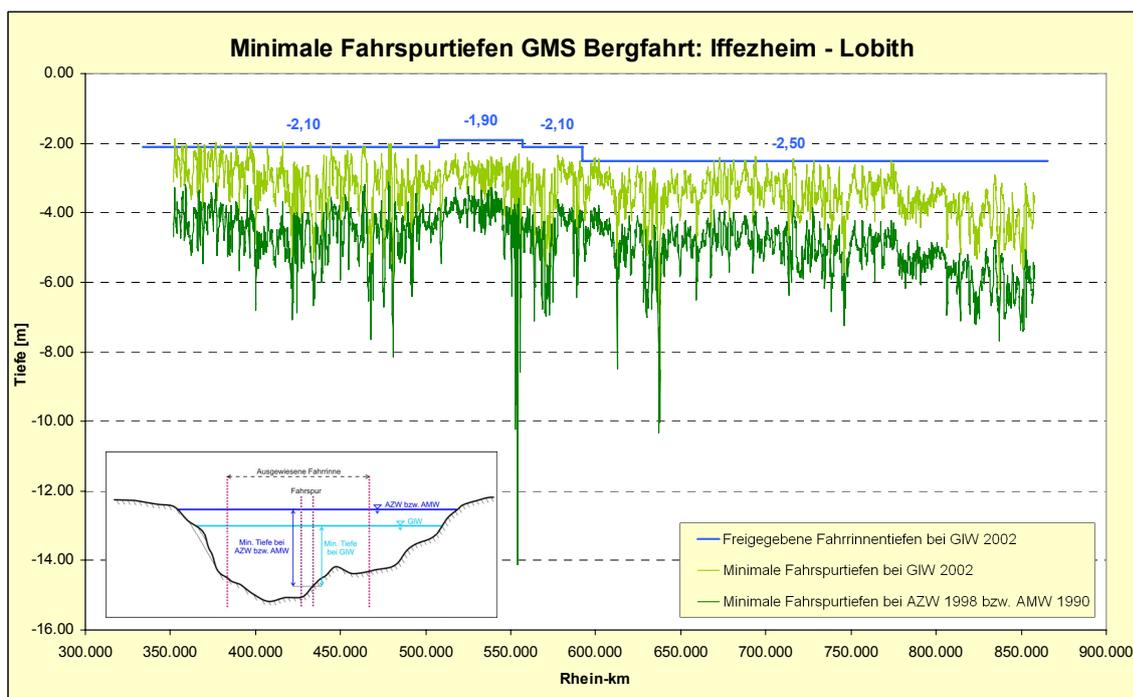


Bild 20: Minimale Fahrspurtiefen für die Bergfahrt des GMS (Tabellenwerte in Anlage 7)

SV 1R 2G (Schubverband einreihig zweigliedrig)

Anhand der Ergebnisse aus den fahrdynamischen Berechnungen für den SV 1R 2G (mit den Abmessungen $L = 185$ m, $B = 11,45$ m) werden in den beiden Diagrammen (siehe *Bild 21* und *Bild 22*) jeweils für die Tal- und Bergfahrt die minimalen Wassertiefen unter den berechneten Fahrspuren aufgeführt. Eine Auflistung der Profile, an welchen die geforderten Tiefen in der Fahrspur nicht eingehalten werden, befindet sich in der Anlage 8.

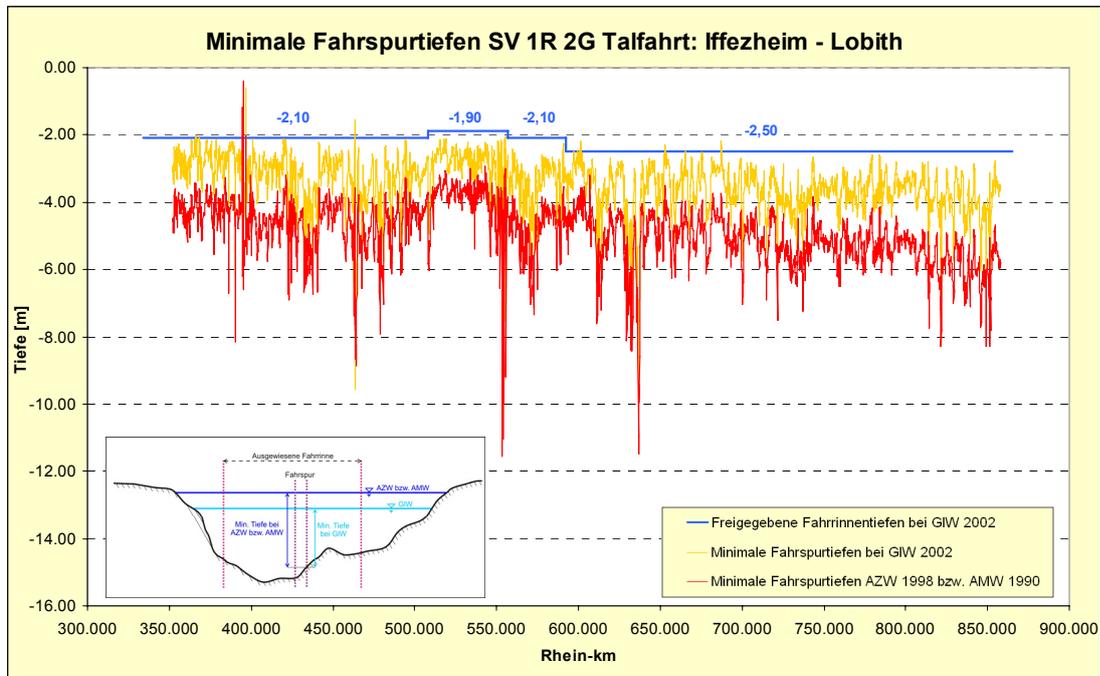


Bild 21: Minimale Fahrspurtiefen für die Talfahrt des SV 1R 2G (Tabellenwerte in Anlage 8)

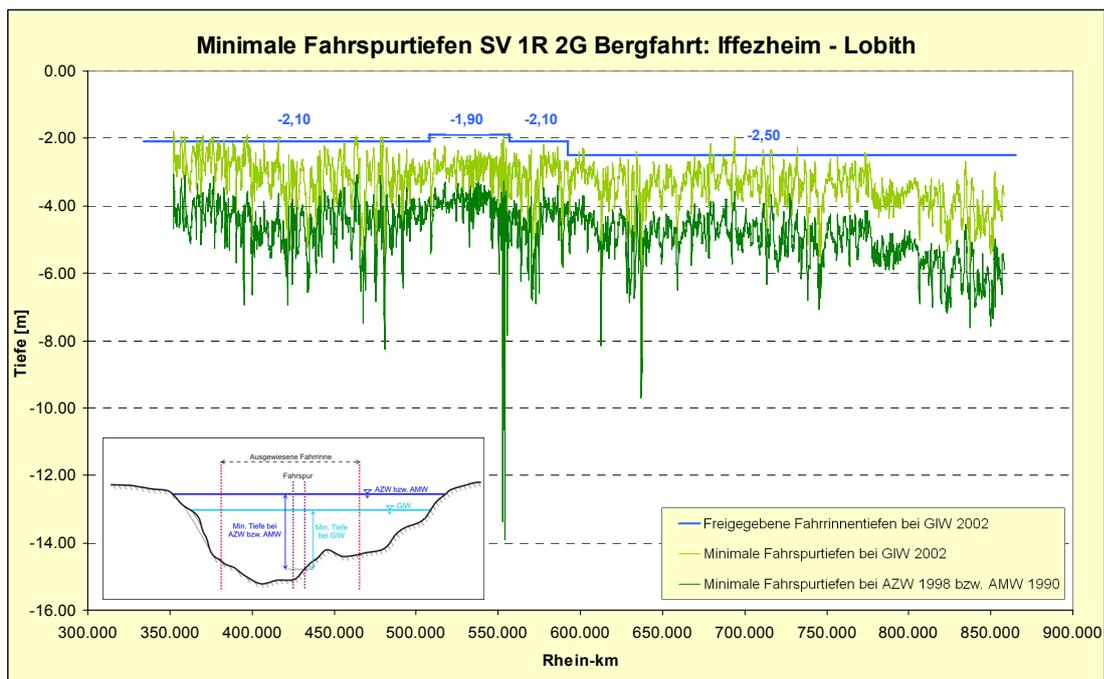


Bild 22: Minimale Fahrspurtiefen für die Bergfahrt des SV 1R 2G (Tabellenwerte in Anlage 8)

SV 2R 2G (Schubverband zweireihig zweigliedrig)

Anhand der Ergebnisse aus den fahrdynamischen Berechnungen für den SV 2R 2G (mit den Abmessungen $L = 185$ m, $B = 22,90$ m) werden in den beiden Diagrammen (siehe *Bild 23* und *Bild 24*) jeweils für die Tal- und Bergfahrt die minimalen Wassertiefen unter den berechneten Fahrspuren aufgeführt. Eine Profilauflistung, an welchen die geforderten Tiefen in der Fahrspur nicht eingehalten werden, befindet sich in der Anlage 9.

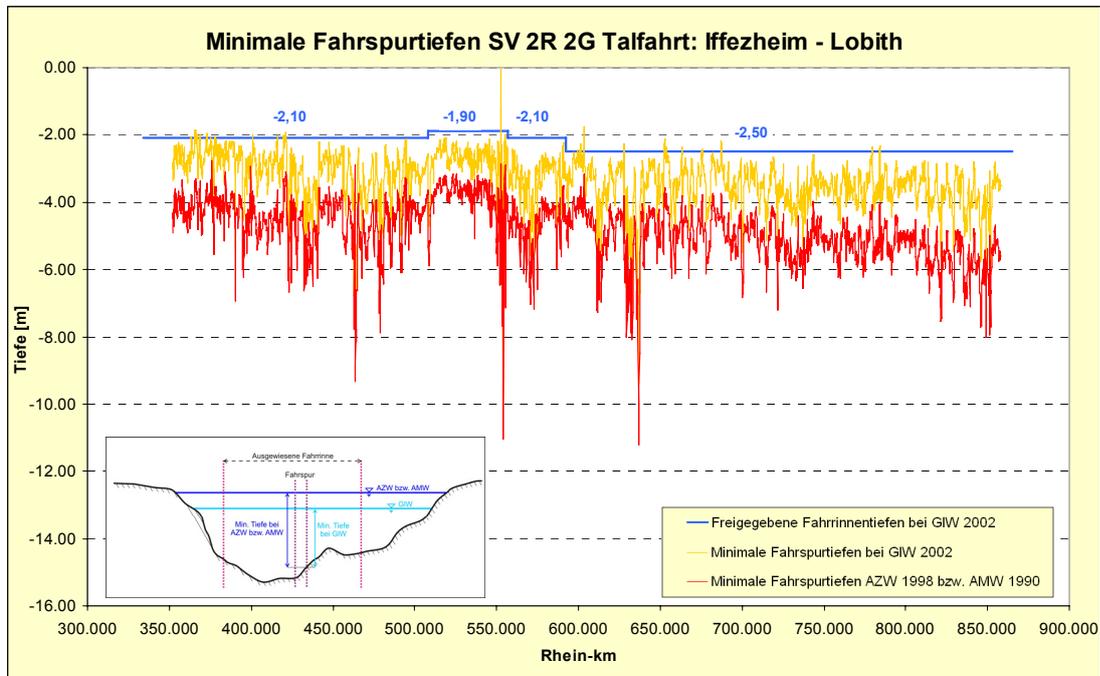


Bild 23: Minimale Fahrspurtiefen für die Talfahrt des SV 2R 2G (Tabellenwerte in Anlage 9)

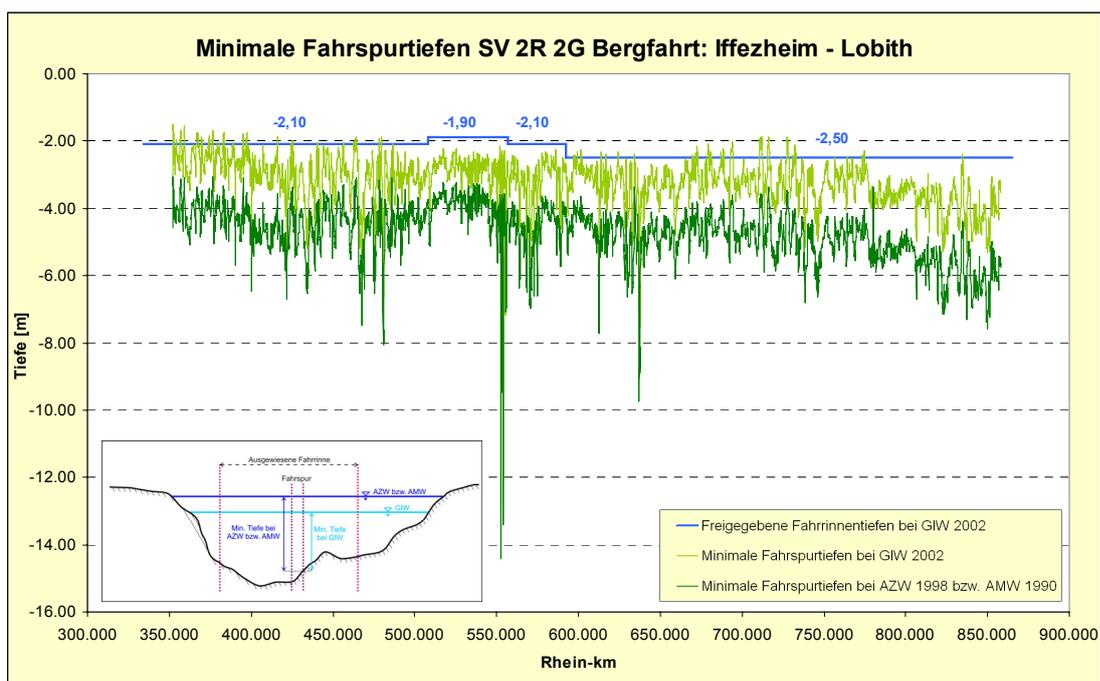


Bild 24: Minimale Fahrspurtiefen für die Bergfahrt des SV 2R 2G (Tabellenwerte in Anlage 9)

Getrennte Überlagerung der Niedrig- bzw. Mittelwasser-Fahrspuren

Für eine weitere fahrdynamische Betrachtung wurden sämtliche Fahrspuren der verschiedenen Schiffstypen (GMS, SV 1R 2G, SV 2R 2G) getrennt für die vorgegebenen Abflussverhältnisse (Niedrigwasser- bzw. Mittelwasserbereich) für die Talfahrt, Bergfahrt, Tal- und Bergfahrt überlagert und auf minimale Tiefen untersucht.

Das *Bild 25* zeigt exemplarisch die Überlagerung der Fahrspuren für die Talfahrt und die Bestimmung der minimalen Tiefen bei vorgegebenen Abflussverhältnissen.

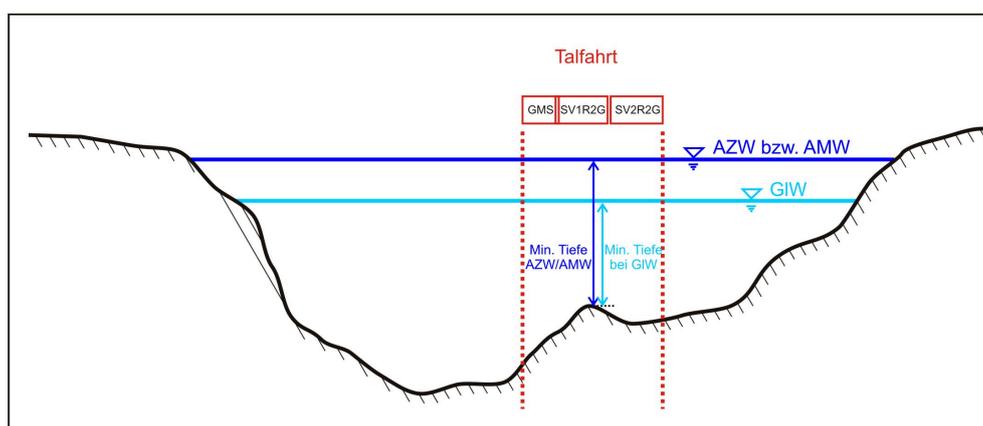


Bild 25: Exemplarische Darstellung der Überlagerung der Fahrspuren für die Talfahrt und Bestimmung der minimalen Tiefen bei vorgegebenen Abflussverhältnissen

In *Bild 27* bis *Bild 29* werden die Ergebnisse jeweils über die Gesamtstrecke dargestellt. In den Anlagen 10 und 11 befinden sich Auflistungen der Profile, an welchen die geforderten Tiefen nicht eingehalten werden.

Ein Sonderfall liegt im Bereich des Braubacher Grundes bei Rh-km 580,300 vor (*Bild 26*). Der überlagerte Tal-Bergfahrt-Fahrspurbereich berücksichtigt nicht die bestehende Fahrrinnenteilung, so dass hier Fehltiefen angezeigt werden.

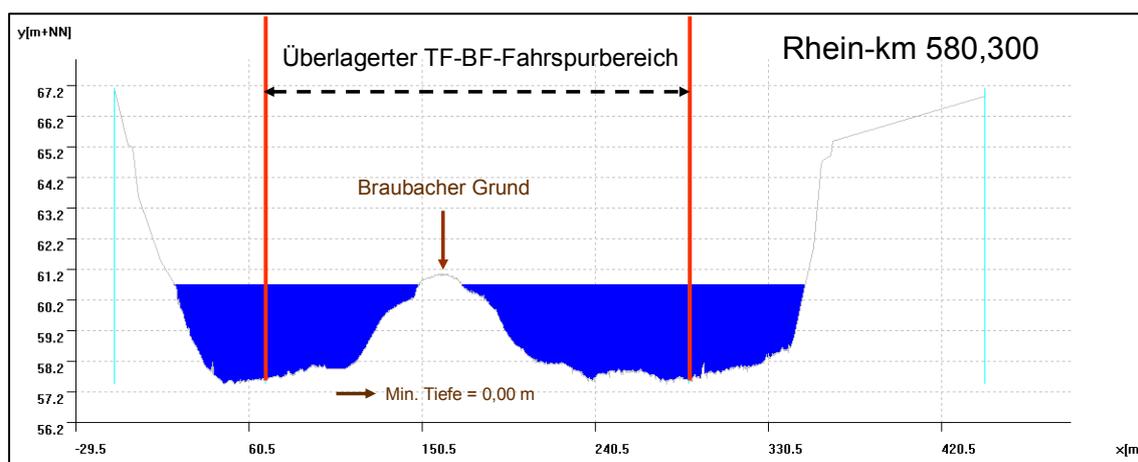


Bild 26: Überlagerter Talfahrt-Bergfahrt-Fahrspurbereich am Braubacher Grund bei GIW 2002

Talfahrt

Das *Bild 27* zeigt die minimalen Tiefen der überlagerten Fahrspuren für die Talfahrt bei vorgegebenen Abflussverhältnissen. Diese Rohdatenanalyse ergibt Hinweise auf Fehlstellen, die zu plausibilisieren sind. Bei den Fehlstellen im Bereich Rh-km 395,000 und 552,000 liegen offensichtlich Datenfehler vor.

Eine Auflistung der Profile, an welchen die freigegebenen Fahrrinntiefen in der überlagerten Fahrspur für die Talfahrt nicht eingehalten werden, befindet sich in der Anlage 10.

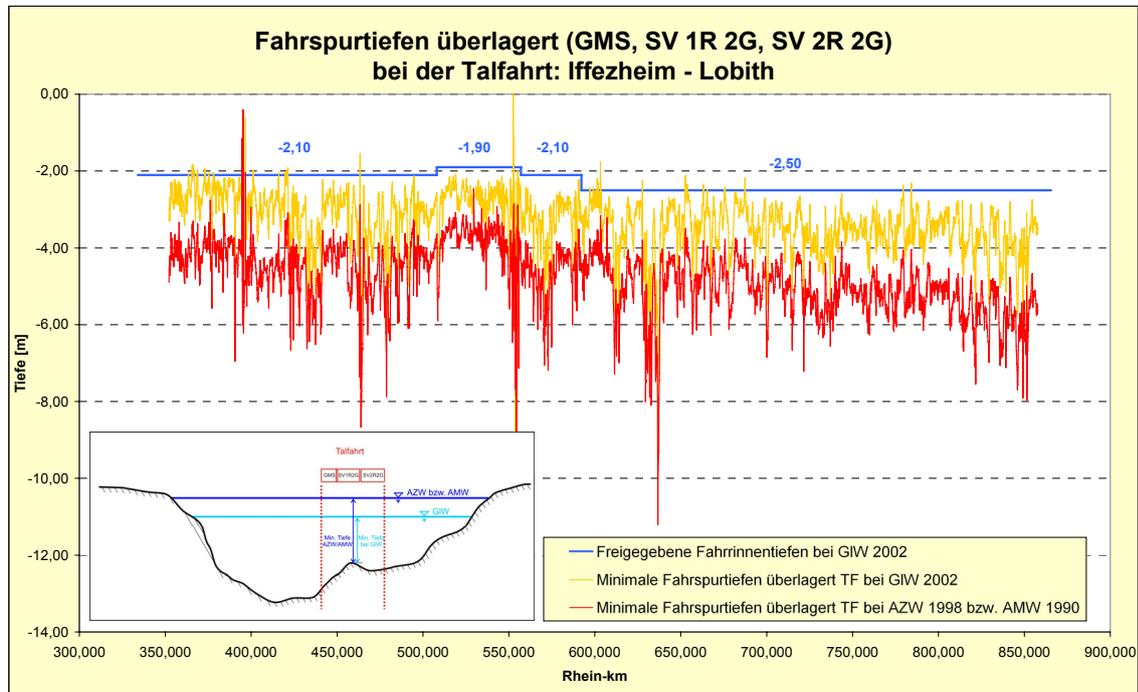


Bild 27: Minimale Fahrspurtiefen überlagert für die Talfahrt (Tabellenwerte in Anlage 10)

Bergfahrt

Das *Bild 28* zeigt die minimalen Tiefen der überlagerten Fahrspuren für die Bergfahrt bei vorgegebenen Abflussverhältnissen. Eine Auflistung der Profile, an welchen die freigegebenen Fahrrinntiefen in der überlagerten Fahrspur für die Bergfahrt nicht eingehalten werden, befindet sich in der Anlage 10.

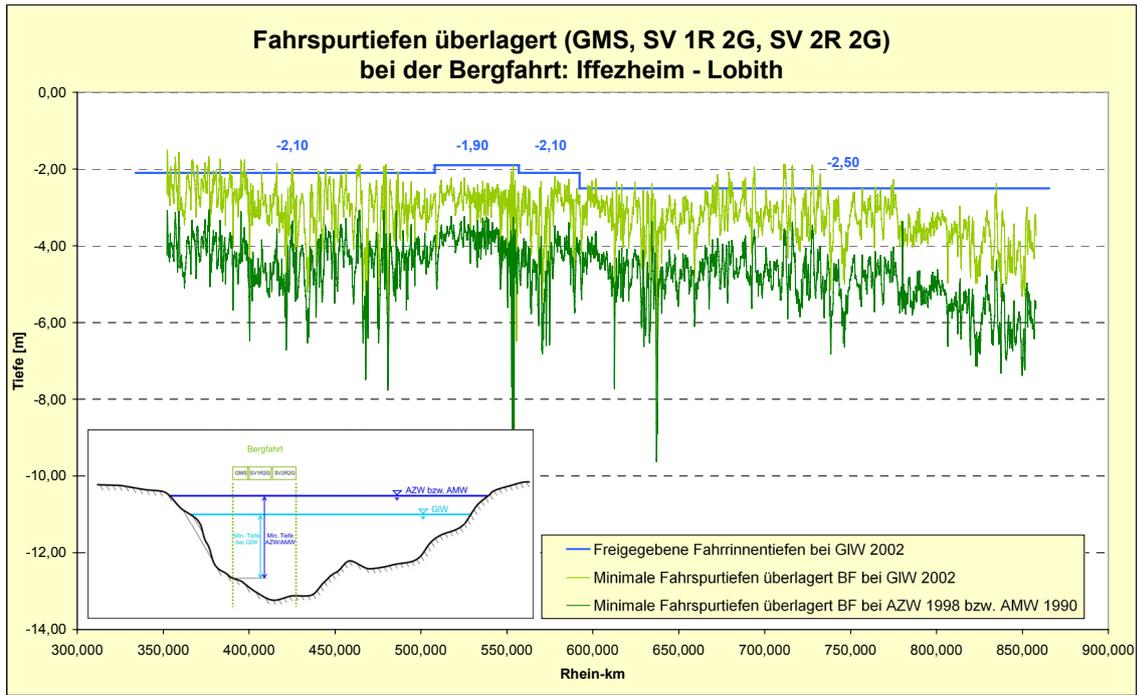


Bild 28: Minimale Fahrspurtiefen überlagert für die Bergfahrt (Tabellenwerte in Anlage 10)

Kombinierte Tal- und Bergfahrt

Das Bild 29 zeigt die minimalen Tiefen der überlagerten Fahrspuren für die kombinierte Tal- und Bergfahrt bei vorgegebenen Abflussverhältnissen. Eine Profilauflistung, an welchen die freigegebenen Fahrinnentiefen in der überlagerten Fahrspur für die Tal- und Bergfahrt nicht eingehalten werden, befindet sich in der Anlage 11.

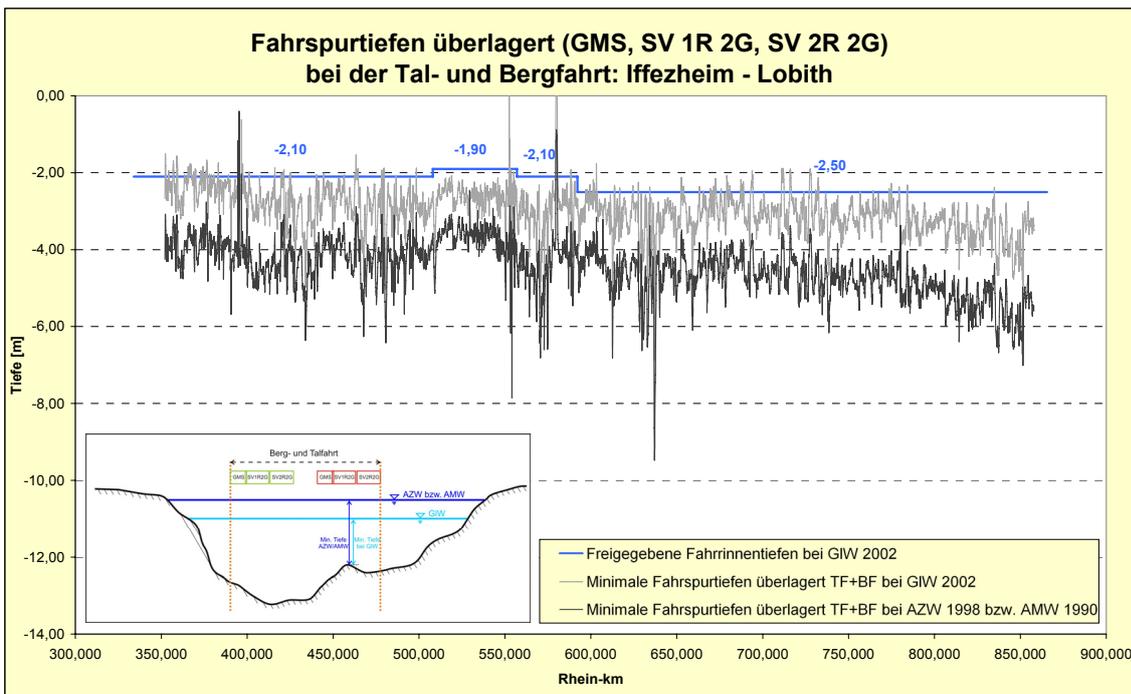


Bild 29: Minimale Fahrspurtiefen überlagert für die kombinierte Tal- und Bergfahrt (Tabellenwerte in Anlage 11)

2.5 Fahrdynamische Breiten- und Tiefenanalyse unter Ausnutzung von Übertiefen

2.5.1 Grundlagen der Engpassidentifikation

Unter der Ausnutzung von Übertiefen wird eine sogenannte Kändelfahrt berechnet. Hierbei wird angenommen, dass ein Schiff in jedem Streckenabschnitt mit einer um 20 cm größeren Abladetiefe fährt als verkehrsgesichert freigegeben ist. Der Kursweg des berechneten Schiffes folgt daher den Übertiefen innerhalb der Fahrrinne bzw. des Fahrwassers und wird zu zusätzlichen Kurvenfahrtmanövern selbst in geraden Strecken gezwungen. Der Kursweg wird daher ungleichmäßiger und es muss bei der Berechnung ständig geprüft werden, ob dieser Weg noch nautisch zumutbar zu fahren ist (siehe *Tabelle 5*). Gleichzeitig wächst der Verkehrsflächenbedarf infolge der zusätzlichen Kurvenfahrten an. Infolge des vergrößerten Verkehrsflächenbedarfs bei gleichzeitigem Absinken der Fahrwasserbreiten ist mit einem erheblichen Anstieg der Bereiche zu rechnen, an denen nicht mehr begegnet werden kann. Die ermittelten Fehltiefen sind aber ein deutlicher Hinweis auf einen möglichen Engpass.

Rhein-km		Fahrrinnen- tiefe bei GIW 2002 [m]	Tiefgang [m]	überhöhte Abladung [m]	Σ Squat- /Flottwert e [m]	bewertete Wassertiefe [m]
von	bis					
334,000	508,000	-2,10	-1,80	2,00	0,30	-2,30
508,000	557,000	-1,90	-1,60	1,80	0,3	-2,10
557,000	592,200	-2,10	-1,80	2,00	0,30	-2,30
592,200	865,500	-2,50	-2,20	2,40	0,30	-2,70

Tabelle 5: Fahrspurtiefen zur Engpassidentifizierung unter Ausnutzung von Übertiefen

2.5.2 Fahrdynamische Breitenauswertung unter Ausnutzung von Übertiefen

Als Bemessungsschiff wird die größte zulässige Schiffseinheit für die Streckenrelation betrachtet. Für den Rhein ist dies der 4-er Schubverband, mit der Ausnahme, dass im Bereich Rh-km 540,000 - 557,000 bei der Talfahrt nur der 2-er Schubverband als größte Einheit zulässig ist. Für die vorliegenden Untersuchungen wurde die Begegnung allerdings für die gesamte Strecke gerechnet. Die angezeigten Breitenengstellen zwischen Rh-km 540,000 und 557,000 dokumentieren also die Notwendigkeit der Verkehrseinschränkung. Als Wasserstand wird der GIW 2002 zugrunde gelegt, die Abladetiefe wird für Wassertiefen entsprechend der *Tabelle 5* berücksichtigt.

Bei der Berechnung der Fahrspuren wurde vorausgesetzt, dass der Schiffsführer vollständige Informationen über den Sohlzustand des Flusses hat. Durch den überhöhten Tiefgang gewinnt die örtliche Wassertiefe für die Wahl des Kursweges an Bedeutung bzw. Teile des Flussbettes, die ursprünglich befahrbar waren, werden jetzt als unbefahrbar erkannt. Die Folge ist, dass das Schiff weitgehend dem Kändel folgen muss. Es werden deutlich mehr Kurvenmanöver notwendig, um den Untiefen auszuweichen, was zu einer Erhöhung des Verkehrsflächenbedarfs führt. In *Bild 30* sind die Ergebnisse aus der Breitenengstellenanalyse für GIW (durchgängige Fahrt mit Normaltiefgang und Kändelfahrt mit überhöhtem Tiefgang) gegenüber gestellt.

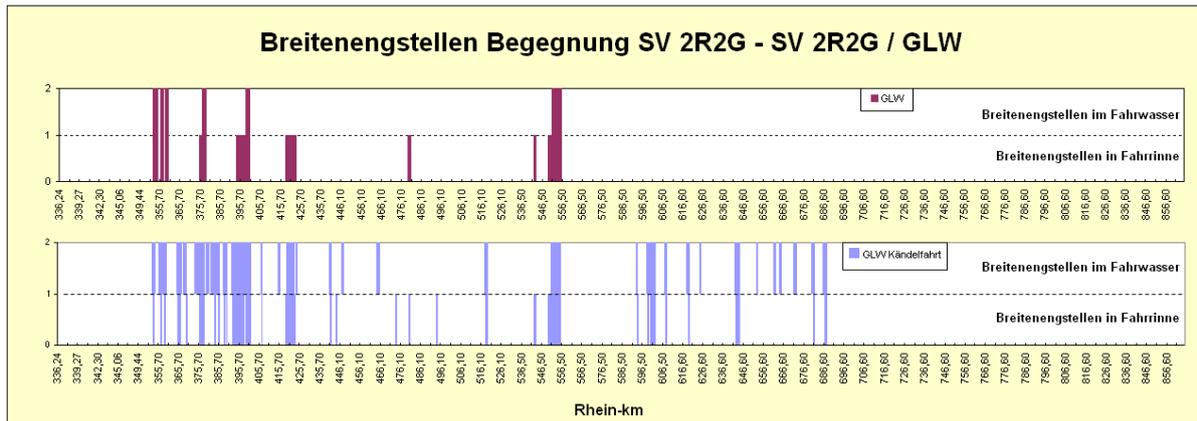


Bild 30: Vergleich der Begegnung zweier 185 m langer und 22,90 m breiter Schubverbände für eine Normalabladung und bei übergroßem Tiefgang (Kändelfahrt)

Durch den erhöhten Verkehrsflächenbedarf in der Kändelfahrt entstehen mehr Breitenengstellen, wie die Farbflächen für die Breitenengstellen in der Fahrrinne im unteren Bereich des Diagramms zeigen. An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass diese aufgezeigten Engstellen theoretische Werte sind. Derartige Engstellen ergeben sich rein rechnerisch, wenn der Verkehrsflächenbedarf der begegnenden Schubverbände inklusive Sicherheitsabstände größer ist als die Fahrrinnenbreite. Im Gegensatz zu den bisherigen Untersuchungen mit Abladetiefen für den durchgängigen Verkehr, bei dem in der Regel Breitenreserven vorhanden sind, da die Fahrwasserbreite größer ist als die Fahrrinnenbreite, sind bei der Kändelfahrt die Fahrwasserbreiten in den meisten Fällen kleiner als die Fahrrinnenbreiten. Das bedeutet, dass die Fahrrinnenbreiten häufig gar nicht genutzt werden können. In dem Diagramm ist demzufolge deutlich zu erkennen, dass die entscheidenden Breitenengstellen im Fahrwasser häufiger auftreten als in der Fahrrinne.

2.5.3 Fahrdynamische Tiefenauswertung unter Ausnutzung von Übertiefen

Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in *Bild 31* und *Bild 32* dargestellt.

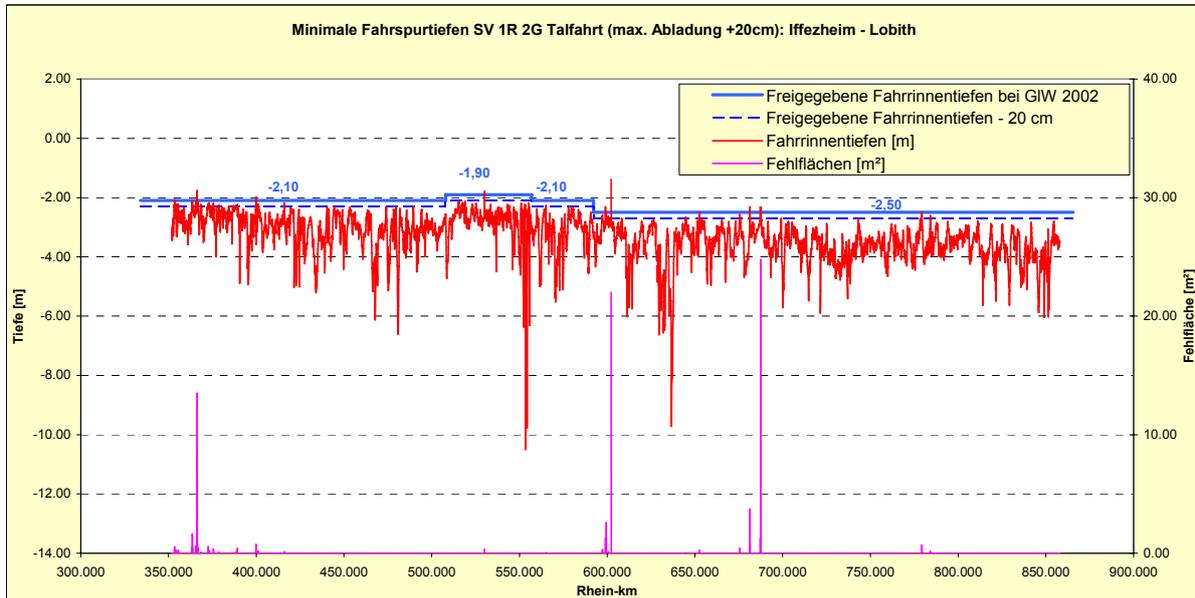


Bild 31: SV 2R 2G-Talfahrt: Fehltiefen und Fehlflächen bei Abladung $T_{max} + 20\text{ cm}$ (Tabellenwerte in Anlage 12)

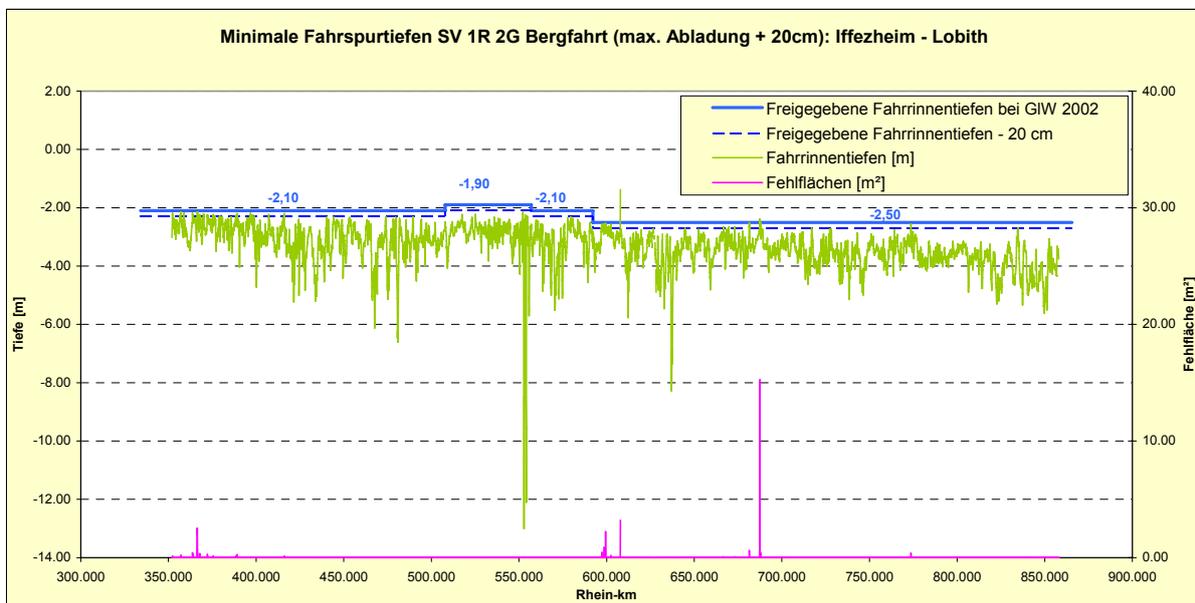


Bild 32: SV 2R 2G-Bergfahrt: Fehltiefen und Fehlflächen bei Abladung $T_{max} + 20\text{ cm}$ (Tabellenwerte in Anlage 12)

Die potenziellen Engpässe können im Lageplan dargestellt werden, um eine erste Bewertung zu erleichtern. *Bild 33* zeigt exemplarisch den Streckenbereich zwischen Rh-km 363,000 und 364,000. Im linken Teil ist der Wasserspiegel in einer Tiefe von GIW -2,10 m als blaue Fläche dargestellt, im rechten Teil ist entsprechend der Wasserspiegel in einer Tiefe von GIW -2,30 m dargestellt.

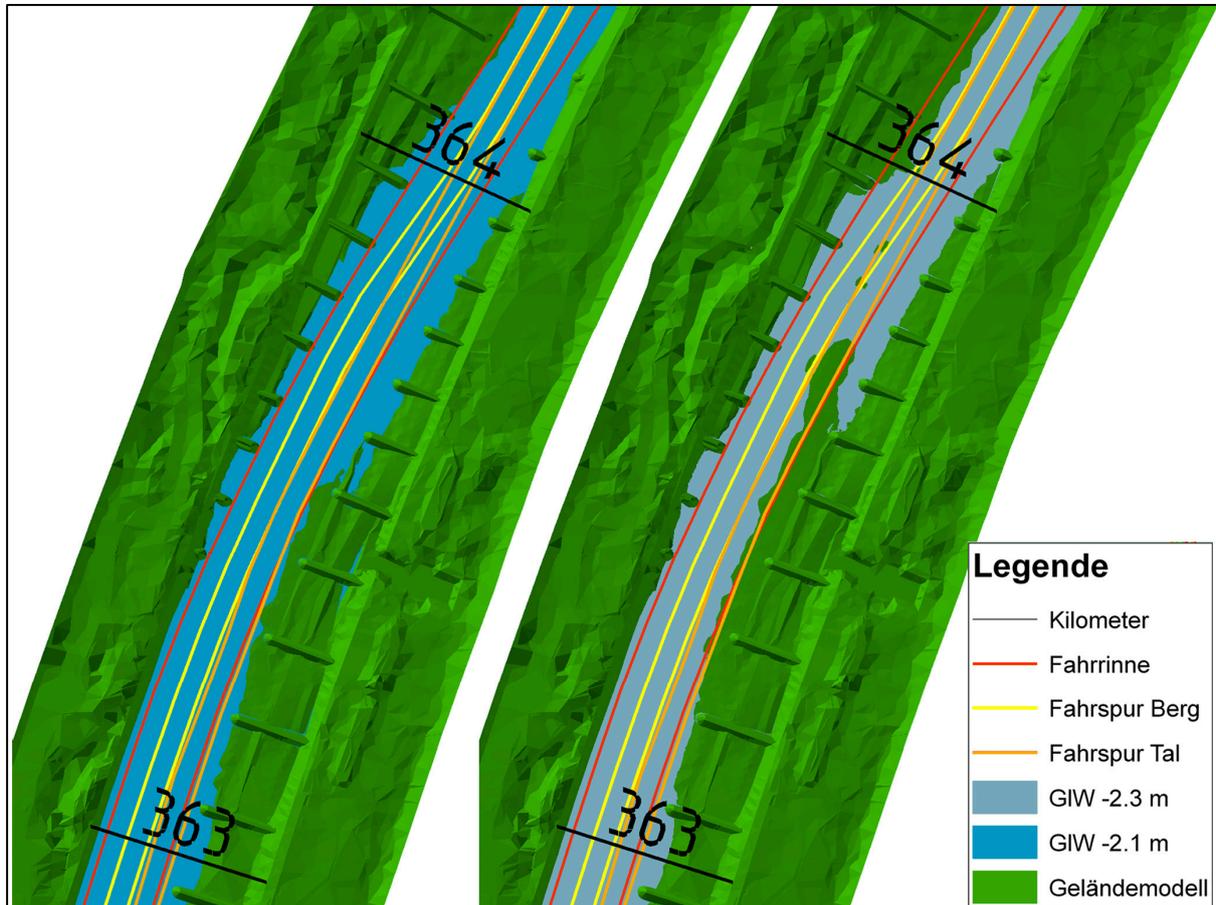


Bild 33: Beispiel eines identifizierten Engpassbereichs aufgrund berechneter Fahrspuren für SV 2R 2G bei GIW (Abladung max + 20 cm)

2.6 Superposition einzelner Engpassidentifizierungen

Die Engpassanalyse wird unterschieden (vgl. 2. Zwischenbericht [1]) in

- Methoden / Kriterien für die Identifikation des Engpasses
- Methoden / Kriterien für eine detaillierte Analyse der Engpässe

Bei der hier durchgeführten Engpassidentifizierung mit Hilfe der geometrischen und fahrdynamischen Breiten- und Tiefenanalyse wurden verschiedene Kriterien untersucht:

- geometrische Tiefenanalyse
- fahrdynamische Breitenanalyse für den durchgängigen Verkehr
- fahrdynamische Tiefenanalyse für den durchgängigen Verkehr
- fahrdynamische Breitenanalyse unter Ausnutzung von Übertiefen
- fahrdynamische Tiefenanalyse unter Ausnutzung von Übertiefen

In diesem Kapitel werden die „Engpassstreffer“ dieser einzelnen Kriterien gruppenweise dargestellt und in geeigneter Form überlagert.

Für die beispielhafte Durchführung einer **geometrischen** Engpassanalyse des Rheins wurden alle Fehltiefen unter GIW im Bereich der Fahrrinne aufgelistet. Da die Anzahl der Treffer sehr groß war, wurde in einem weiteren Schritt die Fahrrinne getrennt nach linkem, mittlerem und rechtem Drittel eingeteilt und nach Fehltiefen hin untersucht (siehe *Bild 34*).

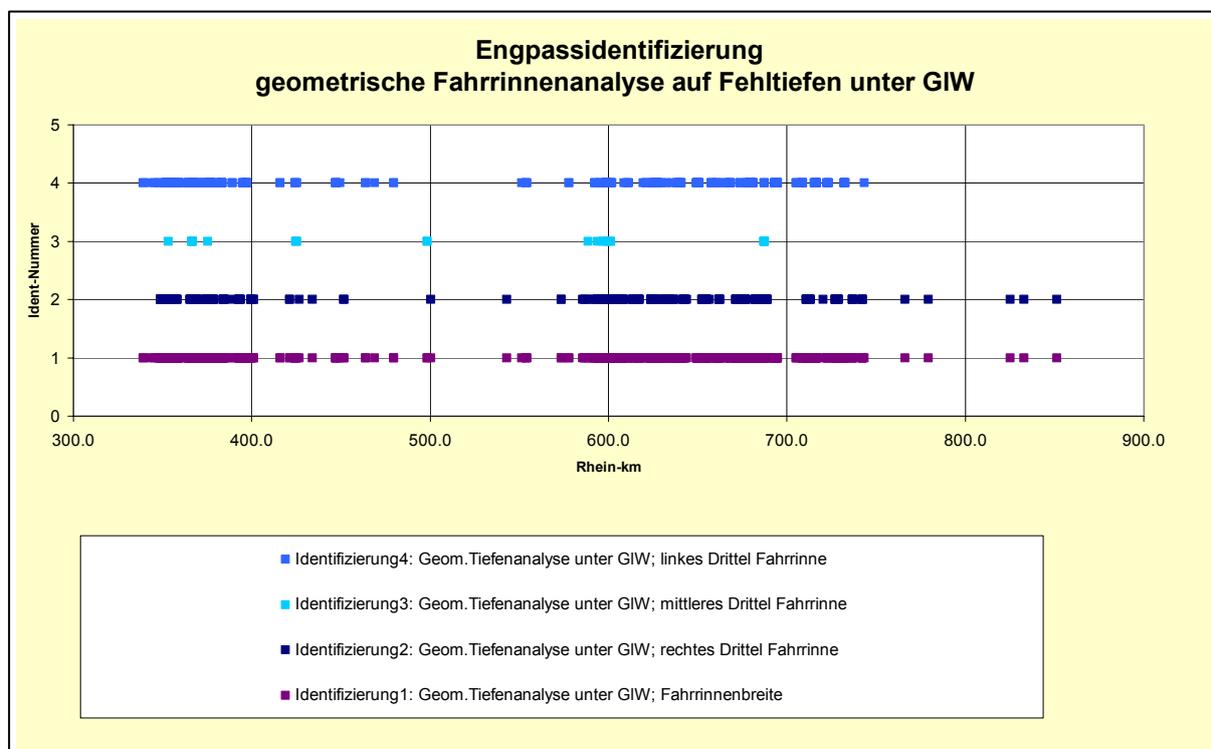


Bild 34: Engpassidentifizierung; geometrische Fahrinnenanalyse (abschnittsweise Darstellung siehe Anlage 13)

Bei der **fahrdynamischen** Analyse wurden Breiten- und Tiefenengstellen verfahrensbedingt getrennt ermittelt. Beim durchgängigen Verkehr wird mit einem auf der gesamten Strecke einheitlichen Tiefenanspruch gerechnet. Das Schiff sucht sich dann den nautisch günstigsten Weg. Die Berechnungen erfolgen unter der Annahme des ungestörten Verkehrs. Die aufgefunden Fehlstellen (Darstellung siehe *Bild 35*) sind dann aber noch nicht untersucht, ob sie nicht auch zu umfahren wären. Das Ergebnis ist also der günstigste Kursweg aus Sicht der Schifffahrt.

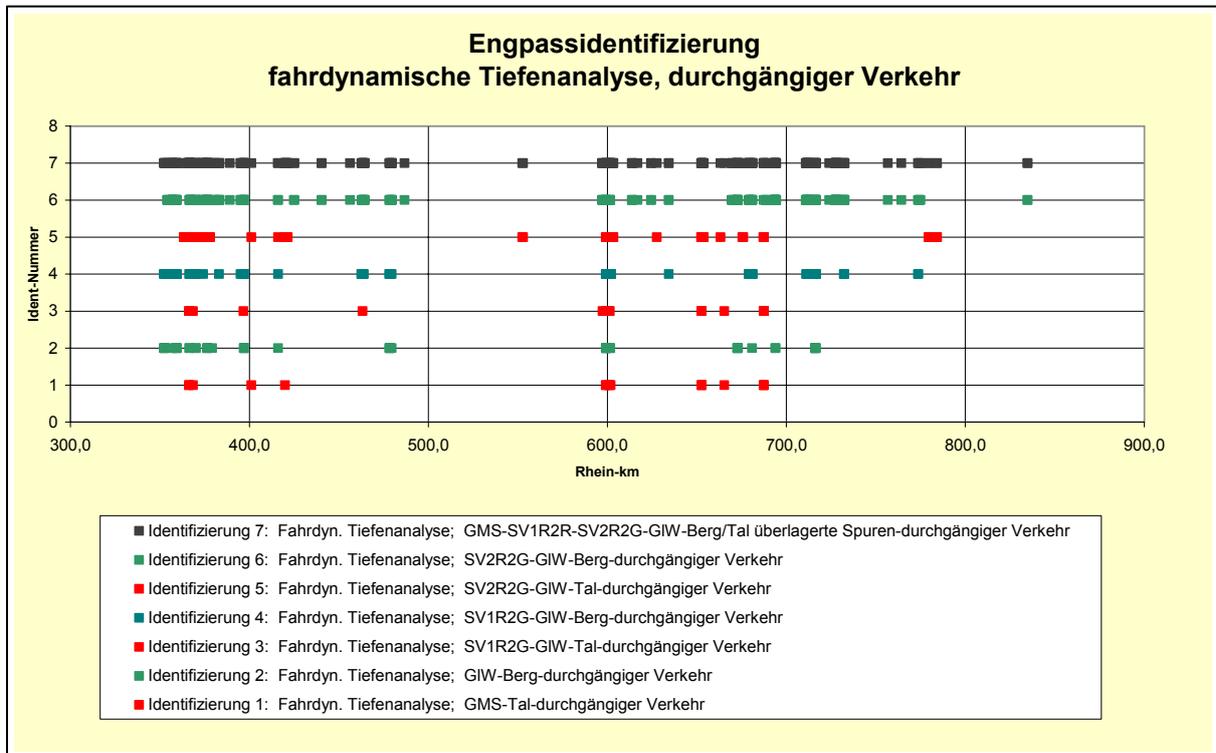


Bild 35: Engpassidentifizierung; fahrdynamische Tiefenanalyse, durchgängiger Verkehr bei GIW 2002 (abschnittsweise Darstellung siehe Anlage 14)

Um Hinweise auf abladerelevante Stellen im Rhein zu bekommen, die von der Schifffahrt nicht oder nur schwer zu umfahren sind, wurden Berechnungen mit einem **erhöhten Tiefenanspruch** für den 4-er Schubverband durchgeführt. Die aufgefunden Fehlstellen sind Engpässe, die unter den gegebenen Randbedingungen der erhöhten Abladung nautisch nicht zu umfahren sind. Das Ergebnis dieser Fehlstellenanalyse (siehe *Bild 36*) stellt also eine Mindestanforderung dar, um vorgegebene Ziele (z. B: 20 cm mehr Abladung durchgängig) zu erreichen.

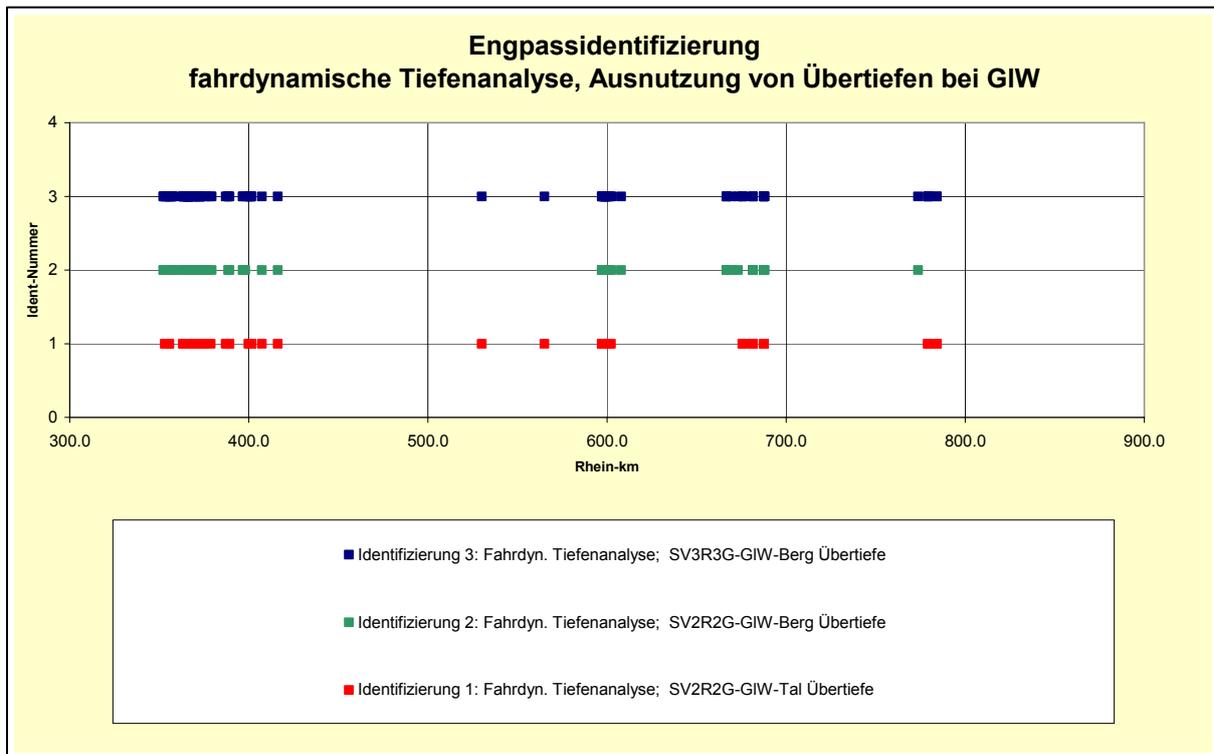


Bild 36: Engpassidentifizierung; fahrdynamische Tiefenanalyse, Übertiefe bei GIW 2002
(abschnittsweise Darstellung siehe Anlage 15)

Die geometrische und fahrdynamische Engpassanalyse des Rheins mit einer Länge von ca. 510 m wird in *Bild 37* als wesentliche Engpassidentifizierung aus den vorangegangenen Analyseverfahren zusammengefasst dargestellt. Hierbei ist der Schwerpunkt auf das mittlere Drittel der Fahrrinne (siehe auch *Bild 34*) sowie auf die fahrdynamischen Breitenanalysen (siehe auch *Bild 30*) und die fahrdynamischen Tiefenanalysen für den 4-er Schubverband (SV 2R 2G) bei GIW (siehe auch *Bild 35 und Bild 36*) gerichtet.

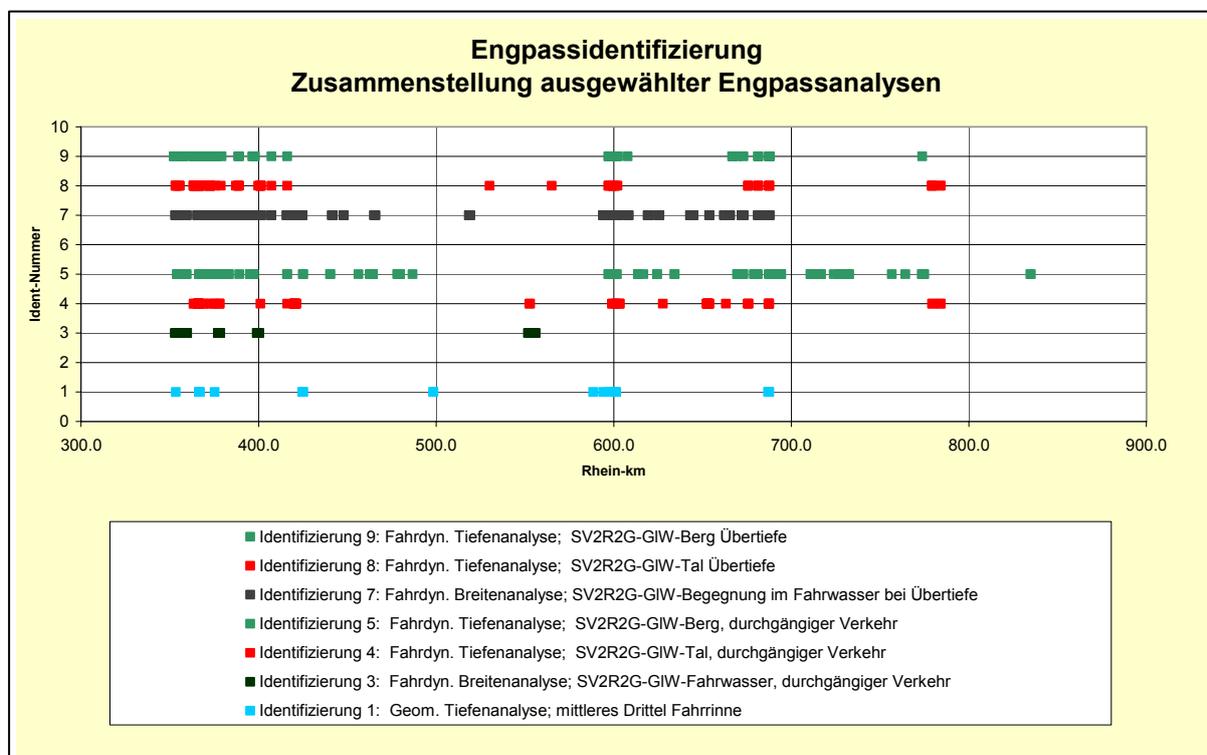


Bild 37: Superposition ausgewählter Engpassidentifizierungen (abschnittsweise Darstellung siehe Anlage 16)

2.7 Zusammenfassung der geometrischen und fahrdynamischen Breiten- und Tiefenanalyse

Bei der **geometrischen Analyse** zeigt sich, dass anhand der verwendeten Querprofilaten in der Summe ca. 35 km potenzielle Engpassbereiche identifiziert wurden. Eine große Anzahl der Werte ist an den Fahrrinnenrändern zu finden und nur ca. 2,5 km sind in der Fahrrinnenmitte vorhanden. Für eine Wertung ist daher die Betrachtung des mittleren Drittels der Fahrrinne vorrangig. Mit Hilfe der zusätzlichen Darstellung der Fehlflächen werden die Fehltiefen in ihrer Bedeutung für die Schifffahrt gewichtet. Geringe Fehlflächen im Randbereich der Fahrrinne ($< 10 \text{ m}^2$) können dabei vermutlich vernachlässigt werden.

Für die **fahrdynamische Auswertung des durchgängigen Verkehrs** wurden von der BAW bei vorgegebenen Abflussverhältnissen (Niedrig- und Mittelwasserbereich) und Schiffstypen (GMS, SV 1R 2G und SV 2R 2G) die jeweils beanspruchten Fahrspurbreiten für Berg- und Talfahrt ermittelt. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden für jede berechnete Schiffspassage (12 Fahrspuren) die minimalen Fahrspurtiefen bestimmt, um so die verschiedenen Schiffstypen bei den unterschiedlichen Abflussverhältnissen hinsichtlich einer optimalen streckenabhängigen Tiefenauslastung bewerten zu können. Des Weiteren wurden sämtliche Fahrspuren der verschiedenen Schiffstypen (GMS, SV 1R 2G, SV 2R 2G) getrennt

für die vorgegebenen Abflussverhältnisse (Niedrig- bzw. Mittelwasserbereich) für die Tal- fahrt, Bergfahrt, Tal- und Bergfahrt überlagert. Die Zusammenfassung aller Fahrspuren zeigt den Verkehrsflächenanspruch. Die fahrdynamische Breiten- und Tiefenanalyse berücksichtigt das Fahrverhalten der Schiffe. Die Betrachtung verschiedener Schiffstypen bei unterschiedlichen Abflüssen ergibt Aussagen zu den benötigten Verkehrsflächen. Damit werden bereits Hinweise zur Optimierung des Fahrrinnenbereiches aufgrund der genutzten bzw. benötigten Verkehrsflächen gegeben. Da hierbei mit einer durchgängigen Abladetiefe der Schiffe gerechnet wurde, geben die Tiefenbewertungen nicht zwingend eine Engstelle aus, da nicht immer das tiefste Wasser als Kursachse genutzt wurde. Dafür ist aber der Kursweg mit nur minimalen Manövern zu durchfahren und aus Sicht der Schifffahrt als geeignet anzusehen.

Bei der **fahrdynamischen Auswertung unter Ausnutzung von Übertiefen** werden Kursachsen unter extremen Bedingungen berechnet. Das Durchfahren der Strecke ist zwar möglich, aufgrund der erforderlichen nautischen Manöver aber nicht immer anzustreben. Es muss daher hinterfragt werden, ob die nautischen Anforderungen an eine sichere Befahrbarkeit eingehalten werden. Dafür werden aber bei der Berechnung Tiefenengstellen deutlich erkannt, sodass für eine Engstellenidentifikation dieses „worst case“-Verfahren geeignet ist.

Aus der **geometrischen- und fahrdynamischen Analyse** hergeleitete Identifikationen von Engstellen sind in Diagrammen zusammengefasst. Dabei ist die Größe der ermittelten Werte, wie z. B. Fehlflächen oder Fehltiefen, nicht ausschlaggebend. Mit den Verfahren sollen Strecken mit potenziellen Engpässen erkannt werden. Eine Bewertung des einzelnen Engpasses muss separat erfolgen.

Das HFD-Modell, das dieser fahrdynamischen Breiten- und Tiefenanalyse zugrunde liegt, eignet sich gut für weitere differenzierte Fragestellungen und Untersuchungsziele wie:

- Engpasserkennung,
- Engpassanalyse,
- Berechnung übergroßer Schiffsverbände,
- Fahrdynamik unter Niedrig- oder Hochwasserbedingungen,
- Bewertung der Befahrbarkeit von Flüssen,
- Kurswegberechnungen,
- Unterstützung bei der Routen- und Verkehrsinformation.

Das Modell basiert auf einem 1D-Strömungsmodell und einem 1D-fahrdynamischen Modell. Weiterentwicklungen zu 2D-Strömungs- und 2D-fahrdynamischen Modellen sind bereits in der Erprobung, so dass die Anwendungsmöglichkeiten dieses HFD-Verfahrens verändert und erweitert werden.

3 Ausblick

In Kombination der Zwischenberichte 3a [2] und 3b wurde die gesamte frei fließende Rhein-
strecke mittels der fünf Analysemethoden, der fahrdynamischen Breiten- und Tiefenanalyse
([2], Kapitel 2.1), der Unfallanalyse ([2], Kapitel 2.2), der Befragung Schifffahrtstreibender
([2], Kapitel 2.3), der Analyse des Streckenverlaufs (nautisch schwierige Strecke, [2], Kapitel
2.4) und der Analyse der Kreuzungsbauwerke ([2], Kapitel 2.5) auf Engpässe untersucht. Ei-
ne aktualisierte Zusammenstellung aller identifizierten Engpässe ist erst im Abschlussbericht
vorgesehen.

Im Abschlussbericht, der dem Auftraggeber KOZAR voraussichtlich Ende 2009 vorgelegt
werden wird, werden die vorliegenden Zwischenberichte 1, 2, 3a und 3b noch einmal zu-
sammengefasst und die Ergebnisse einer ersten, umfassenden Engpassanalyse zum Zeitpunkt
Dezember 2008 (Datenerhebung) vorgelegt.

Des Weiteren wird anhand der Aufbereitung exemplarischer Engpässe (ein Engpass je be-
troffenem Amtsabschnitt) die Systematik der der Identifikation nachlaufenden Engpassaufbe-
reitung (Detailanalyse) vorgestellt. Diese sogenannten Muster- oder Pilotengpässe dienen da-
zu, die Systematik des sogenannten „Handbuch EPA“ zu verdeutlichen. Dieses Handbuch
wird als zukünftige Handlungsanweisung für die Rheinämter das maßgebliche Ergebnis der
PG EPA werden und dem Abschlussbericht aus Gründen der Übersichtlichkeit als separater
Anhang beigelegt werden. Es konzentriert die Beschreibung der Zukunftsaufgabe einer ge-
bündelten Engpassauswertung sowohl von Seiten der Ämter als auch einer übergeordneten
Nachfolgergruppe der PG EPA und wird ähnlich wie bei der EKG in Form einer zusammen-
fassenden Tabelle alle notwendigen Aufgaben in Verbindung mit den derzeit zur Verfügung
stehenden Dienstposten in den einzelnen WSÄ auführen.

Anschließend wird der Bericht an KOZAR mit der Empfehlung übergeben, das Handbuch
EPA innerhalb der WSDen West und Südwest in die Linie zu überführen.

Aufgestellt, im Juni 2009
Für die Projektgruppe



Sebastian Messing
Projektleiter

4 Literatur

- [1] 2. Zwischenbericht, Projektgruppe Engpassanalyse Rhein, Stand März 2006
- [2] Zwischenbericht 3a, Projektgruppe Engpassanalyse Rhein, Stand Juni 2007
- [3] 1D-HN-Modelle Iffezheim–Lobith, Operatives Dynamisches Modell, BAW-Bericht, September 2007
- [4] Hydraulisch-fahrdynamische Modelle zur Optimierung der Befahrbarkeit von Binnenwasserstraßen, WasserWirtschaft 4/2009
- [5] Identifizierung potenzieller Tiefen-Engpässe des Rheins zwischen Iffezheim und Lobith, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Universität Karlsruhe, Oktober 2008

Anlagen

Anlagenverzeichnis

Anlage 1	Tabellenwerte zu Bild 6
Anlage 2	Tabellenwerte zu Bild 7
Anlage 3	Tabellenwerte zu Bild 8
Anlage 4	Tabellenwerte zu Bild 9
Anlage 5	Tabellenwerte zu Bild 16
Anlage 6	Tabellenwerte zu Bild 17
Anlage 7	Tabellenwerte zu Bild 19 und Bild 20
Anlage 8	Tabellenwerte zu Bild 21 und Bild 22
Anlage 9	Tabellenwerte zu Bild 23 und Bild 24
Anlage 10	Tabellenwerte zu Bild 27 und Bild 28
Anlage 11	Tabellenwerte zu Bild 29
Anlage 12	Tabellenwerte zu Bild 31 und Bild 32
Anlage 13	Tabellenwerte zu Bild 34
Anlage 14	Tabellenwerte zu Bild 36
Anlage 15	Tabellenwerte zu Bild 36
Anlage 16	Tabellenwerte zu Bild 37

Anlage 1

Tabellenwerte zu Bild 6

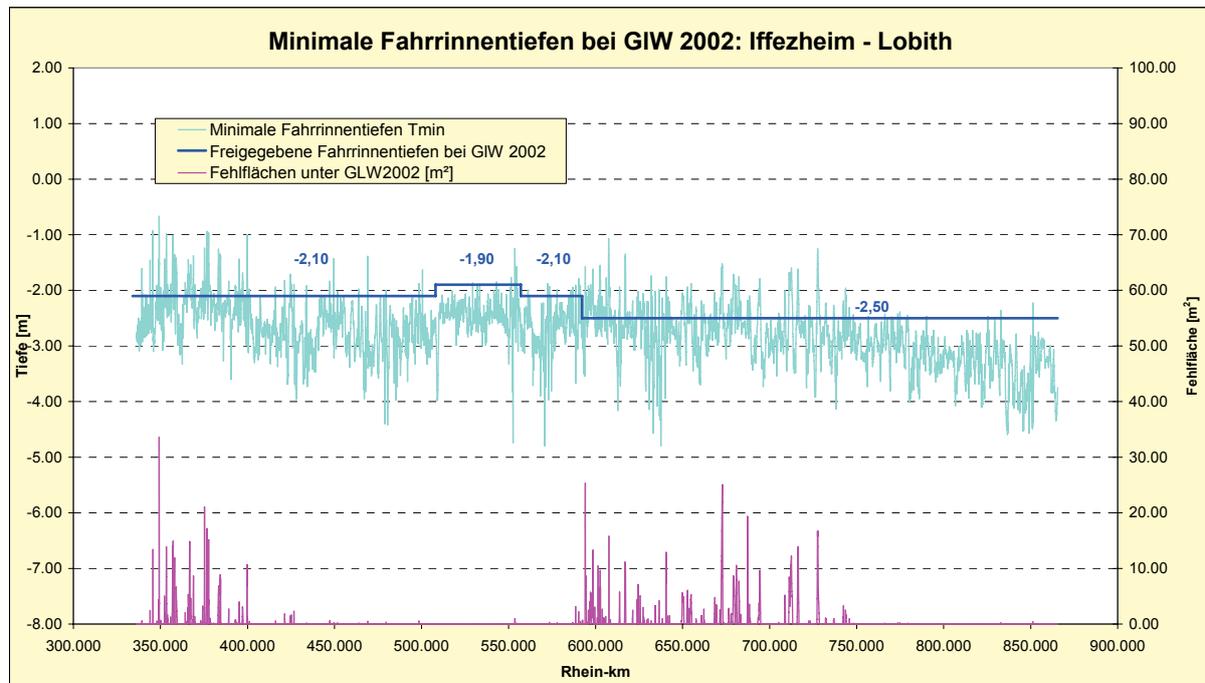


Bild 6: Vergleich der minimalen Tiefen im Fahrrinnenbereich mit den freigegebenen Fahrrinntiefen bei GIW 2002

Tabellenwerte zu Bild 6

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
339,330	-1,61	-2,10	0,49	0,53
339,650	-2,05	-2,10	0,05	0,03
341,270	-2,08	-2,10	0,02	0,00
344,030	-1,46	-2,10	0,64	2,40
345,700	-0,93	-2,10	1,17	13,37
347,830	-2,06	-2,10	0,04	0,03
347,920	-1,91	-2,10	0,19	0,51
348,800	-2,01	-2,10	0,09	0,14
348,820	-1,85	-2,10	0,25	1,27
348,840	-1,92	-2,10	0,18	0,69
348,880	-1,84	-2,10	0,26	1,26
348,900	-1,73	-2,10	0,37	2,10
348,920	-1,65	-2,10	0,45	2,95
348,940	-1,61	-2,10	0,49	2,81
348,970	-1,44	-2,10	0,66	4,37
349,000	-1,77	-2,10	0,33	1,35
349,030	-1,59	-2,10	0,51	2,52
349,060	-1,81	-2,10	0,29	1,01
349,080	-1,75	-2,10	0,35	1,21
349,100	-1,77	-2,10	0,33	1,01
349,140	-1,77	-2,10	0,33	1,16
349,160	-1,91	-2,10	0,19	0,49
349,180	-2,01	-2,10	0,09	0,07
349,230	-0,67	-2,10	1,43	33,56
349,260	-1,12	-2,10	0,98	11,12
349,280	-1,20	-2,10	0,90	8,51
349,300	-1,54	-2,10	0,56	3,64
349,320	-1,51	-2,10	0,59	3,86
350,000	-2,07	-2,10	0,03	0,02
350,020	-2,05	-2,10	0,05	0,09
350,040	-1,95	-2,10	0,15	0,67
350,080	-1,98	-2,10	0,12	0,27
350,100	-2,02	-2,10	0,08	0,07
350,120	-1,99	-2,10	0,11	0,39
350,140	-2,03	-2,10	0,07	0,05
350,160	-2,09	-2,10	0,01	0,00
350,480	-2,03	-2,10	0,07	0,06
352,000	-2,01	-2,10	0,09	0,06
352,200	-2,07	-2,10	0,03	0,04
352,300	-1,44	-2,10	0,66	5,02
352,400	-1,57	-2,10	0,53	3,61
352,500	-1,69	-2,10	0,41	2,10

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
352,600	-1,79	-2,10	0,31	1,86
352,700	-1,89	-2,10	0,21	1,31
352,800	-1,81	-2,10	0,29	1,28
353,000	-2,07	-2,10	0,03	0,01
353,100	-2,09	-2,10	0,01	0,01
353,200	-1,63	-2,10	0,47	4,11
353,300	-1,44	-2,10	0,66	6,57
353,400	-0,98	-2,10	1,12	13,90
353,500	-1,35	-2,10	0,75	8,53
353,600	-1,67	-2,10	0,43	3,65
353,700	-2,00	-2,10	0,10	0,11
354,100	-1,90	-2,10	0,20	1,62
354,200	-2,00	-2,10	0,10	0,50
354,300	-1,95	-2,10	0,15	0,93
354,400	-2,09	-2,10	0,01	0,01
355,500	-2,07	-2,10	0,03	0,04
355,700	-1,94	-2,10	0,16	0,19
355,800	-2,00	-2,10	0,10	0,31
355,900	-1,89	-2,10	0,21	1,26
356,700	-1,89	-2,10	0,21	0,68
356,800	-1,88	-2,10	0,22	1,60
356,900	-1,62	-2,10	0,48	3,36
357,000	-1,13	-2,10	0,97	13,94
357,100	-1,01	-2,10	1,09	13,21
357,200	-1,04	-2,10	1,06	14,86
357,300	-1,38	-2,10	0,72	10,08
357,400	-1,77	-2,10	0,33	2,90
357,700	-1,96	-2,10	0,14	0,67
357,800	-1,87	-2,10	0,23	2,15
357,900	-1,64	-2,10	0,46	4,93
358,000	-1,49	-2,10	0,61	9,39
358,100	-1,36	-2,10	0,74	11,90
358,200	-1,85	-2,10	0,25	2,19
358,900	-1,88	-2,10	0,22	1,29
359,000	-1,54	-2,10	0,56	6,49
359,100	-1,42	-2,10	0,68	6,69
359,200	-1,55	-2,10	0,55	4,56
359,300	-1,58	-2,10	0,52	4,06
359,400	-1,69	-2,10	0,41	2,32
359,500	-1,86	-2,10	0,24	1,24
364,200	-1,86	-2,10	0,24	2,05
364,300	-1,94	-2,10	0,16	0,65
364,400	-2,03	-2,10	0,07	0,16
364,500	-1,98	-2,10	0,12	0,44
364,700	-2,01	-2,10	0,09	0,32
365,500	-2,04	-2,10	0,06	0,10

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
365,600	-1,85	-2,10	0,25	1,52
365,700	-1,71	-2,10	0,39	2,86
365,800	-2,01	-2,10	0,09	0,12
365,900	-1,94	-2,10	0,16	0,67
366,000	-1,45	-2,10	0,65	5,30
366,100	-1,55	-2,10	0,55	2,89
366,200	-1,70	-2,10	0,40	1,61
366,300	-1,88	-2,10	0,22	0,72
366,400	-2,09	-2,10	0,01	0,03
366,500	-2,01	-2,10	0,09	0,63
366,600	-1,86	-2,10	0,24	7,85
366,700	-1,76	-2,10	0,34	13,57
366,800	-1,70	-2,10	0,40	14,81
366,900	-1,74	-2,10	0,36	9,56
367,000	-1,89	-2,10	0,21	2,76
367,100	-1,87	-2,10	0,23	1,98
367,200	-1,88	-2,10	0,22	1,47
367,300	-1,86	-2,10	0,24	0,85
367,400	-1,54	-2,10	0,56	4,64
367,500	-1,98	-2,10	0,12	0,37
368,500	-1,98	-2,10	0,12	0,75
368,600	-1,94	-2,10	0,16	0,52
368,700	-1,80	-2,10	0,30	1,41
368,800	-1,65	-2,10	0,45	5,33
368,900	-1,38	-2,10	0,72	8,62
369,000	-1,51	-2,10	0,59	8,56
369,700	-1,90	-2,10	0,20	1,34
369,800	-1,92	-2,10	0,18	0,44
369,900	-1,99	-2,10	0,11	0,34
370,000	-1,98	-2,10	0,12	0,17
370,100	-1,97	-2,10	0,13	0,18
370,200	-2,04	-2,10	0,06	0,04
373,000	-1,97	-2,10	0,13	0,60
373,100	-1,97	-2,10	0,13	0,38
373,200	-1,99	-2,10	0,11	0,34
374,000	-2,09	-2,10	0,01	0,01
374,100	-2,03	-2,10	0,07	0,10
374,200	-1,84	-2,10	0,26	2,20
374,300	-1,84	-2,10	0,26	3,20
374,400	-1,87	-2,10	0,23	2,53
375,100	-2,06	-2,10	0,04	0,04
375,200	-1,71	-2,10	0,39	3,77
375,300	-1,24	-2,10	0,86	21,05
375,400	-1,46	-2,10	0,64	9,08
375,500	-1,87	-2,10	0,23	2,86

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
376,100	-1,92	-2,10	0,18	0,21
376,300	-1,83	-2,10	0,27	1,58
376,400	-1,74	-2,10	0,36	1,91
376,500	-1,64	-2,10	0,46	3,11
376,600	-1,29	-2,10	0,81	8,22
376,700	-1,53	-2,10	0,57	3,20
376,800	-0,94	-2,10	1,16	17,13
376,900	-1,27	-2,10	0,83	8,63
377,000	-0,97	-2,10	1,13	8,00
377,400	-1,57	-2,10	0,53	2,97
377,500	-1,33	-2,10	0,77	5,82
377,600	-1,10	-2,10	1,00	15,12
377,700	-0,97	-2,10	1,13	15,15
377,800	-1,55	-2,10	0,55	3,57
377,900	-1,53	-2,10	0,57	4,25
378,000	-1,86	-2,10	0,24	1,00
378,100	-1,86	-2,10	0,24	0,92
378,200	-2,02	-2,10	0,08	0,12
378,300	-1,95	-2,10	0,15	0,53
378,400	-1,91	-2,10	0,19	0,91
378,500	-1,93	-2,10	0,17	0,93
378,600	-2,00	-2,10	0,10	0,99
378,700	-2,05	-2,10	0,05	0,13
379,200	-2,05	-2,10	0,05	0,11
379,300	-2,02	-2,10	0,08	0,05
380,700	-2,06	-2,10	0,04	0,12
380,800	-2,08	-2,10	0,02	0,04
383,000	-2,03	-2,10	0,07	0,14
383,100	-1,80	-2,10	0,30	1,55
383,200	-1,61	-2,10	0,49	2,90
383,300	-1,52	-2,10	0,58	5,19
383,400	-1,26	-2,10	0,84	5,80
383,500	-1,36	-2,10	0,74	6,84
383,600	-1,66	-2,10	0,44	1,87
384,000	-1,83	-2,10	0,27	1,24
384,100	-1,62	-2,10	0,48	3,93
384,200	-1,56	-2,10	0,54	5,18
384,300	-1,35	-2,10	0,75	8,85
384,400	-1,47	-2,10	0,63	5,35
384,500	-1,38	-2,10	0,72	8,16
384,600	-1,88	-2,10	0,22	0,27
384,700	-2,02	-2,10	0,08	0,19
389,100	-2,04	-2,10	0,06	0,27
389,200	-1,84	-2,10	0,26	2,67
392,900	-2,00	-2,10	0,10	0,14
393,000	-1,91	-2,10	0,19	0,75
393,100	-1,97	-2,10	0,13	0,37
393,200	-1,93	-2,10	0,17	0,59

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
393,300	-1,95	-2,10	0,15	0,27
393,400	-2,10	-2,10	0,00	0,01
394,000	-2,02	-2,10	0,08	0,18
394,100	-2,21	-2,10	-0,11	0,00
395,000	-2,08	-2,10	0,02	0,02
395,100	-1,52	-2,10	0,58	3,43
395,200	-1,44	-2,10	0,66	3,93
395,300	-1,47	-2,10	0,63	3,27
396,500	-1,99	-2,10	0,11	0,12
396,900	-2,03	-2,10	0,07	0,07
397,000	-1,97	-2,10	0,13	0,38
397,100	-1,88	-2,10	0,22	1,33
397,200	-1,75	-2,10	0,35	2,95
397,300	-1,69	-2,10	0,41	3,08
397,400	-1,86	-2,10	0,24	0,66
399,600	-2,03	-2,10	0,07	0,02
399,700	-1,48	-2,10	0,62	6,77
399,800	-1,00	-2,10	1,10	10,66
399,900	-1,63	-2,10	0,47	1,25
400,000	-1,81	-2,10	0,29	0,79
401,100	-1,98	-2,10	0,12	0,46
401,200	-2,02	-2,10	0,08	0,19
401,400	-2,09	-2,10	0,01	0,00
416,000	-2,05	-2,10	0,05	0,03
416,100	-1,94	-2,10	0,16	0,53
421,300	-2,09	-2,10	0,01	0,00
421,400	-1,82	-2,10	0,28	1,83
421,500	-1,88	-2,10	0,22	0,79
424,400	-1,82	-2,10	0,28	1,02
424,500	-1,71	-2,10	0,39	1,43
424,600	-2,03	-2,10	0,07	0,45
424,700	-2,09	-2,10	0,01	0,01
424,900	-2,00	-2,10	0,10	0,53
425,200	-1,89	-2,10	0,21	1,62
426,700	-1,90	-2,10	0,20	2,30
434,000	-1,92	-2,10	0,18	0,16
447,000	-1,99	-2,10	0,11	0,11
447,100	-2,08	-2,10	0,02	0,03
447,200	-1,95	-2,10	0,15	0,29
447,300	-1,84	-2,10	0,26	0,57
447,400	-1,92	-2,10	0,18	0,53

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
449,600	-1,43	-2,10	0,67	0,21
451,600	-2,03	-2,10	0,07	0,07
451,700	-2,02	-2,10	0,08	0,17
451,800	-2,09	-2,10	0,01	0,00
463,900	-2,00	-2,10	0,10	0,12
464,000	-1,98	-2,10	0,12	0,12
469,100	-1,39	-2,10	0,71	0,48
479,600	-2,09	-2,10	0,01	0,01
479,700	-2,00	-2,10	0,10	0,31
498,400	-2,01	-2,10	0,09	0,04
498,500	-1,88	-2,10	0,22	0,53
500,500	-1,63	-2,10	0,47	0,01
529,400	-1,87	-1,90	0,03	0,00
533,500	-1,89	-1,90	0,01	0,00
543,000	-1,85	-1,90	0,05	0,02
551,500	-1,77	-1,90	0,13	0,04
553,600	-1,25	-1,90	0,65	0,95
553,700	-1,69	-1,90	0,21	0,81
554,500	-1,57	-1,90	0,33	0,11
572,400	-1,88	-2,10	0,22	0,00
573,400	-2,03	-2,10	0,07	0,02
573,500	-1,93	-2,10	0,17	0,28
574,200	-2,09	-2,10	0,01	0,00
577,900	-1,99	-2,10	0,11	0,20
585,700	-2,01	-2,10	0,09	0,07
586,700	-2,03	-2,10	0,07	0,09
586,900	-1,95	-2,10	0,15	0,26
588,500	-1,91	-2,10	0,19	3,13
590,200	-1,91	-2,10	0,19	0,16
590,300	-1,79	-2,10	0,31	2,20

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
590,700	-2,09	-2,10	0,01	0,00
590,800	-2,03	-2,10	0,07	0,04
590,900	-2,07	-2,10	0,03	0,00
591,200	-1,91	-2,10	0,19	0,41
592,300	-2,25	-2,50	0,25	0,61
592,400	-2,13	-2,50	0,37	0,02
592,500	-2,26	-2,50	0,24	0,69
593,500	-2,48	-2,50	0,02	0,01
594,000	-1,87	-2,50	0,63	17,33
594,100	-1,57	-2,50	0,93	25,31
594,200	-1,97	-2,50	0,53	8,29
594,300	-2,04	-2,50	0,46	5,04
594,400	-2,23	-2,50	0,27	2,58
594,500	-2,05	-2,50	0,45	8,57
594,600	-2,35	-2,50	0,15	1,10
594,800	-2,48	-2,50	0,02	0,00
594,900	-2,22	-2,50	0,28	0,17
595,500	-2,37	-2,50	0,13	0,01
595,600	-2,12	-2,50	0,38	0,32
595,800	-2,38	-2,50	0,12	0,04
595,900	-1,92	-2,50	0,58	2,45
596,000	-2,24	-2,50	0,26	0,49
596,100	-2,35	-2,50	0,15	0,27
596,200	-2,18	-2,50	0,32	0,78
596,300	-2,22	-2,50	0,28	0,79
596,400	-2,35	-2,50	0,15	0,18
596,500	-2,16	-2,50	0,34	0,84
596,600	-2,11	-2,50	0,39	2,40
596,700	-2,11	-2,50	0,39	0,68
596,800	-1,97	-2,50	0,53	4,04
596,900	-2,36	-2,50	0,14	0,89
597,000	-2,14	-2,50	0,36	5,69
597,100	-1,90	-2,50	0,60	4,36
597,200	-2,08	-2,50	0,42	3,71
597,300	-2,12	-2,50	0,38	2,49
597,400	-2,45	-2,50	0,05	0,03
597,500	-2,11	-2,50	0,39	3,76
597,600	-2,34	-2,50	0,16	0,79
597,700	-2,07	-2,50	0,43	4,13
597,800	-2,03	-2,50	0,47	4,07
597,900	-2,05	-2,50	0,45	5,50
598,000	-2,24	-2,50	0,26	1,42
598,100	-2,13	-2,50	0,37	1,68
598,200	-2,24	-2,50	0,26	1,18
598,300	-2,16	-2,50	0,34	1,82
598,400	-1,88	-2,50	0,62	5,94
598,500	-1,62	-2,50	0,88	9,59

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
598,600	-1,65	-2,50	0,85	13,27
598,700	-2,13	-2,50	0,37	2,45
598,800	-2,45	-2,50	0,05	0,02
599,100	-2,44	-2,50	0,06	0,17
599,200	-2,42	-2,50	0,08	0,23
599,300	-2,41	-2,50	0,09	0,17
599,400	-2,45	-2,50	0,05	0,04
599,500	-2,27	-2,50	0,23	3,03
600,700	-2,41	-2,50	0,09	0,04
601,000	-2,28	-2,50	0,22	1,11
601,400	-2,19	-2,50	0,31	10,44
601,500	-2,21	-2,50	0,29	2,90
601,600	-2,18	-2,50	0,32	2,32
601,700	-2,09	-2,50	0,41	6,54
601,800	-2,48	-2,50	0,02	0,00
601,900	-2,12	-2,50	0,38	6,43
602,000	-2,12	-2,50	0,38	3,15
602,100	-2,70	-2,50	-0,20	0,00
602,200	-2,03	-2,50	0,47	1,25
602,300	-2,24	-2,50	0,26	1,04
602,400	-2,11	-2,50	0,39	4,63
602,500	-1,99	-2,50	0,51	4,38
602,600	-1,55	-2,50	0,95	9,64
602,700	-2,48	-2,50	0,02	0,00
602,800	-1,81	-2,50	0,69	6,67
602,900	-2,44	-2,50	0,06	0,04
603,000	-2,37	-2,50	0,13	0,16
603,200	-2,45	-2,50	0,05	0,00
603,300	-2,78	-2,50	-0,28	0,00
603,700	-2,23	-2,50	0,27	0,02
603,800	-2,11	-2,50	0,39	2,66
604,000	-2,30	-2,50	0,20	0,48
604,100	-2,47	-2,50	0,03	0,01
604,200	-2,45	-2,50	0,05	0,00
604,300	-2,44	-2,50	0,06	0,05
604,400	-2,39	-2,50	0,11	0,36
604,500	-2,29	-2,50	0,21	1,06
604,600	-2,29	-2,50	0,21	0,37
604,700	-2,40	-2,50	0,10	0,01
604,800	-2,32	-2,50	0,18	0,31
604,900	-2,31	-2,50	0,19	1,00
605,000	-2,38	-2,50	0,12	0,57
605,700	-2,32	-2,50	0,18	1,35
605,800	-2,31	-2,50	0,19	1,22
606,100	-1,78	-2,50	0,72	0,00
606,200	-2,00	-2,50	0,50	0,03
606,300	-2,16	-2,50	0,34	0,00
607,200	-2,25	-2,50	0,25	0,03
607,300	-1,92	-2,50	0,58	0,01

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
607,400	-1,42	-2,50	1,08	0,07
607,500	-1,07	-2,50	1,43	0,13
607,600	-1,37	-2,50	1,13	0,03
607,700	-1,56	-2,50	0,94	15,78
607,800	-1,69	-2,50	0,81	0,01
607,900	-1,93	-2,50	0,57	0,04
608,000	-2,12	-2,50	0,38	0,00
608,100	-1,95	-2,50	0,55	0,05
608,400	-2,39	-2,50	0,11	0,01
608,500	-2,32	-2,50	0,18	0,81
608,700	-2,46	-2,50	0,04	0,00
608,800	-2,35	-2,50	0,15	0,01
609,600	-2,49	-2,50	0,01	0,00
610,200	-2,46	-2,50	0,04	0,01
611,200	-2,36	-2,50	0,14	0,01
611,300	-2,41	-2,50	0,09	0,03
613,300	-2,39	-2,50	0,11	0,10
613,600	-2,35	-2,50	0,15	0,51
613,700	-2,20	-2,50	0,30	2,66
613,800	-1,94	-2,50	0,56	5,71
614,000	-2,20	-2,50	0,30	0,76
616,700	-2,27	-2,50	0,23	1,05
616,800	-1,77	-2,50	0,73	6,77
616,900	-1,40	-2,50	1,10	11,13
617,000	-1,43	-2,50	1,07	10,25
617,100	-1,35	-2,50	1,15	10,66
617,200	-1,41	-2,50	1,09	9,34
617,300	-1,84	-2,50	0,66	4,10
617,700	-2,48	-2,50	0,02	0,00
617,900	-2,42	-2,50	0,08	0,00
618,000	-2,43	-2,50	0,07	0,00
618,500	-2,39	-2,50	0,11	0,00
619,300	-2,48	-2,50	0,02	0,01
619,600	-2,39	-2,50	0,11	0,00
619,700	-2,47	-2,50	0,03	0,00
621,100	-2,40	-2,50	0,10	0,08
621,200	-2,25	-2,50	0,25	0,89
621,300	-2,19	-2,50	0,31	2,44
622,900	-2,48	-2,50	0,02	0,00
623,600	-2,48	-2,50	0,02	0,00
623,700	-2,36	-2,50	0,14	0,26
623,800	-2,17	-2,50	0,33	3,49

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
623,900	-2,12	-2,50	0,38	4,37
624,000	-2,17	-2,50	0,33	2,58
624,100	-2,21	-2,50	0,29	1,90
624,200	-2,37	-2,50	0,13	0,34
624,300	-2,30	-2,50	0,20	0,65
624,400	-2,15	-2,50	0,35	4,02
624,500	-2,02	-2,50	0,48	7,06
624,600	-2,36	-2,50	0,14	1,82
624,700	-2,48	-2,50	0,02	0,01
624,800	-2,35	-2,50	0,15	1,46
624,900	-2,42	-2,50	0,08	0,26
625,000	-2,38	-2,50	0,12	0,60
625,100	-2,38	-2,50	0,12	0,46
625,200	-2,46	-2,50	0,04	0,02
625,300	-2,24	-2,50	0,26	0,43
625,400	-2,35	-2,50	0,15	0,01
625,500	-2,47	-2,50	0,03	0,02
625,600	-2,23	-2,50	0,27	2,81
625,700	-2,20	-2,50	0,30	5,06
625,800	-2,41	-2,50	0,09	0,00
625,900	-2,23	-2,50	0,27	0,39
626,500	-2,36	-2,50	0,14	0,03
627,100	-2,39	-2,50	0,11	0,01
627,200	-2,34	-2,50	0,16	0,28
627,300	-2,06	-2,50	0,44	2,99
627,500	-2,09	-2,50	0,41	0,61
627,600	-2,37	-2,50	0,13	0,19
627,700	-2,19	-2,50	0,31	1,21
627,900	-2,24	-2,50	0,26	0,74
628,000	-2,43	-2,50	0,07	0,00
629,400	-2,20	-2,50	0,30	0,68
629,900	-2,38	-2,50	0,12	0,00
630,000	-2,37	-2,50	0,13	0,02
630,100	-2,40	-2,50	0,10	0,04
630,200	-2,21	-2,50	0,29	0,89
630,300	-2,47	-2,50	0,03	0,01
631,900	-1,74	-2,50	0,76	0,57
632,400	-2,10	-2,50	0,40	0,01
632,500	-2,31	-2,50	0,19	0,01
634,100	-2,34	-2,50	0,16	0,27
634,200	-2,18	-2,50	0,32	2,05
634,300	-2,02	-2,50	0,48	3,31
634,400	-2,35	-2,50	0,15	0,23
636,400	-2,39	-2,50	0,11	0,11

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
636,500	-2,12	-2,50	0,38	1,17
636,600	-1,99	-2,50	0,51	4,18
638,200	-2,34	-2,50	0,16	0,04
638,300	-2,14	-2,50	0,36	0,23
638,400	-2,27	-2,50	0,23	0,96
638,600	-2,42	-2,50	0,08	0,00
639,200	-2,42	-2,50	0,08	0,02
639,300	-2,48	-2,50	0,02	0,00
640,300	-2,45	-2,50	0,05	0,03
640,400	-1,92	-2,50	0,58	7,13
640,500	-1,78	-2,50	0,72	12,88
640,600	-1,76	-2,50	0,74	10,75
640,700	-2,07	-2,50	0,43	2,16
640,800	-2,46	-2,50	0,04	0,06
641,600	-2,12	-2,50	0,38	1,44
641,900	-2,41	-2,50	0,09	0,29
642,300	-2,37	-2,50	0,13	0,28
642,500	-2,21	-2,50	0,29	1,52
642,600	-2,31	-2,50	0,19	0,45
643,200	-2,47	-2,50	0,03	0,01
643,800	-2,49	-2,50	0,01	0,01
649,300	-2,36	-2,50	0,14	0,46
649,400	-2,39	-2,50	0,11	0,61
649,500	-2,39	-2,50	0,11	0,49
649,600	-2,43	-2,50	0,07	0,44
649,700	-2,27	-2,50	0,23	1,65
649,800	-2,17	-2,50	0,33	4,17
649,900	-2,05	-2,50	0,45	5,57
650,000	-2,09	-2,50	0,41	4,63
650,100	-2,14	-2,50	0,36	3,87
650,200	-2,10	-2,50	0,40	4,96
650,300	-2,16	-2,50	0,34	4,78
650,400	-2,10	-2,50	0,40	4,84
650,500	-2,16	-2,50	0,34	4,82
650,600	-2,25	-2,50	0,25	3,06
650,700	-2,40	-2,50	0,10	0,61
650,800	-2,41	-2,50	0,09	0,14
652,400	-2,43	-2,50	0,07	0,11
652,500	-2,28	-2,50	0,22	1,67
652,600	-2,10	-2,50	0,40	3,81
652,700	-1,96	-2,50	0,54	5,20
652,800	-1,94	-2,50	0,56	4,90
652,900	-2,02	-2,50	0,48	6,06

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
653,000	-2,29	-2,50	0,21	1,74
653,100	-2,40	-2,50	0,10	0,25
653,300	-2,46	-2,50	0,04	0,07
653,500	-2,42	-2,50	0,08	0,17
653,600	-2,38	-2,50	0,12	0,42
653,700	-2,25	-2,50	0,25	1,34
653,800	-2,34	-2,50	0,16	1,02
653,900	-2,24	-2,50	0,26	2,80
654,000	-2,41	-2,50	0,09	0,22
654,100	-2,46	-2,50	0,04	0,06
654,400	-2,30	-2,50	0,20	1,85
654,500	-2,20	-2,50	0,30	2,15
654,600	-2,16	-2,50	0,34	4,32
654,700	-2,14	-2,50	0,36	4,39
654,800	-1,99	-2,50	0,51	5,10
654,900	-1,88	-2,50	0,62	5,26
655,000	-2,11	-2,50	0,39	3,82
655,100	-2,27	-2,50	0,23	1,72
655,200	-2,25	-2,50	0,25	2,23
656,600	-2,44	-2,50	0,06	0,01
657,600	-2,45	-2,50	0,05	0,05
657,700	-2,30	-2,50	0,20	0,93
657,800	-2,37	-2,50	0,13	0,67
657,900	-2,36	-2,50	0,14	0,44
660,800	-2,34	-2,50	0,16	0,46
660,900	-2,19	-2,50	0,31	1,48
661,000	-2,26	-2,50	0,24	1,10
661,100	-2,44	-2,50	0,06	0,12
662,000	-2,46	-2,50	0,04	0,03
662,100	-2,31	-2,50	0,19	1,08
662,200	-2,25	-2,50	0,25	2,64
662,300	-2,48	-2,50	0,02	0,03
662,400	-2,42	-2,50	0,08	0,71
662,500	-2,42	-2,50	0,08	0,21
663,000	-2,48	-2,50	0,02	0,01
665,300	-2,48	-2,50	0,02	0,02
666,100	-2,43	-2,50	0,07	0,05
666,200	-2,46	-2,50	0,04	0,05
668,100	-2,35	-2,50	0,15	0,12
668,200	-2,26	-2,50	0,24	0,76
668,300	-2,18	-2,50	0,32	1,81
668,400	-2,04	-2,50	0,46	3,73
668,500	-2,09	-2,50	0,41	4,74

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
669,100	-2,48	-2,50	0,02	0,04
669,200	-2,45	-2,50	0,05	0,20
669,300	-2,32	-2,50	0,18	0,65
669,400	-2,22	-2,50	0,28	3,44
669,500	-2,31	-2,50	0,19	2,18
669,600	-2,42	-2,50	0,08	0,29
671,300	-2,35	-2,50	0,15	0,37
671,400	-2,27	-2,50	0,23	0,96
671,500	-2,14	-2,50	0,36	2,50
671,600	-2,14	-2,50	0,36	1,67
671,700	-2,26	-2,50	0,24	1,20
671,800	-2,42	-2,50	0,08	0,24
671,900	-2,19	-2,50	0,31	0,30
672,000	-2,26	-2,50	0,24	1,02
672,100	-1,99	-2,50	0,51	2,98
672,200	-1,75	-2,50	0,75	8,30
672,300	-1,59	-2,50	0,91	11,26
672,400	-1,75	-2,50	0,75	12,19
672,500	-1,75	-2,50	0,75	16,77
672,600	-1,65	-2,50	0,85	19,02
672,700	-1,52	-2,50	0,98	22,07
672,800	-1,56	-2,50	0,94	25,05
672,900	-1,59	-2,50	0,91	21,87
673,000	-2,06	-2,50	0,44	8,63
673,100	-2,43	-2,50	0,07	0,08
673,600	-2,41	-2,50	0,09	0,30
673,800	-2,47	-2,50	0,03	0,01
673,900	-2,44	-2,50	0,06	0,12
675,800	-2,42	-2,50	0,08	0,08
675,900	-2,47	-2,50	0,03	0,01
676,300	-2,38	-2,50	0,12	0,36
676,400	-2,29	-2,50	0,21	0,97
676,500	-2,28	-2,50	0,22	2,32
676,600	-2,25	-2,50	0,25	2,79
676,700	-2,32	-2,50	0,18	1,44
676,800	-2,36	-2,50	0,14	1,58
676,900	-2,42	-2,50	0,08	0,26
677,700	-2,35	-2,50	0,15	0,21
677,800	-2,16	-2,50	0,34	1,88
678,600	-2,41	-2,50	0,09	0,22
678,700	-2,37	-2,50	0,13	0,40
678,800	-2,14	-2,50	0,36	1,74
678,900	-2,16	-2,50	0,34	1,84
679,000	-2,08	-2,50	0,42	2,86
679,100	-1,87	-2,50	0,63	7,26
679,200	-1,78	-2,50	0,72	8,28
679,300	-1,76	-2,50	0,74	8,62

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
679,400	-1,71	-2,50	0,79	7,96
679,500	-1,84	-2,50	0,66	7,05
679,600	-1,78	-2,50	0,72	6,58
679,700	-1,92	-2,50	0,58	6,05
679,800	-1,90	-2,50	0,60	5,05
679,900	-1,97	-2,50	0,53	3,36
680,000	-2,38	-2,50	0,12	0,29
680,400	-2,35	-2,50	0,15	0,38
680,500	-2,20	-2,50	0,30	1,39
680,600	-2,05	-2,50	0,45	3,00
680,700	-2,01	-2,50	0,49	5,03
680,800	-1,92	-2,50	0,58	9,55
680,900	-1,93	-2,50	0,57	10,52
681,000	-2,01	-2,50	0,49	7,87
681,100	-2,15	-2,50	0,35	5,54
681,200	-2,33	-2,50	0,17	1,95
681,900	-2,32	-2,50	0,18	0,15
682,300	-2,30	-2,50	0,20	1,88
682,400	-1,76	-2,50	0,74	7,69
682,500	-1,97	-2,50	0,53	5,78
682,600	-2,18	-2,50	0,32	4,04
682,700	-2,37	-2,50	0,13	1,00
682,800	-2,39	-2,50	0,11	0,10
683,000	-2,42	-2,50	0,08	0,10
683,100	-2,19	-2,50	0,31	1,03
683,200	-2,19	-2,50	0,31	1,67
683,300	-2,31	-2,50	0,19	1,51
683,400	-2,23	-2,50	0,27	1,69
683,500	-2,31	-2,50	0,19	0,85
683,600	-2,42	-2,50	0,08	0,07
687,100	-2,46	-2,50	0,04	0,09
687,200	-2,36	-2,50	0,14	1,83
687,300	-2,18	-2,50	0,32	19,34
687,400	-2,19	-2,50	0,31	9,97
687,500	-2,35	-2,50	0,15	4,28
687,600	-2,42	-2,50	0,08	0,29
688,300	-2,42	-2,50	0,08	0,15
688,400	-2,10	-2,50	0,40	3,56
688,700	-2,23	-2,50	0,27	1,02
688,800	-2,30	-2,50	0,20	0,60
688,900	-2,36	-2,50	0,14	0,44
689,000	-2,43	-2,50	0,07	0,08
693,100	-2,48	-2,50	0,02	0,01
693,200	-2,35	-2,50	0,15	0,34
693,300	-2,26	-2,50	0,24	0,95
693,400	-2,21	-2,50	0,29	1,19
693,500	-2,29	-2,50	0,21	0,66

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
693,600	-2,26	-2,50	0,24	0,77
693,700	-2,27	-2,50	0,23	0,98
693,800	-2,16	-2,50	0,34	1,58
693,900	-1,96	-2,50	0,54	3,80
694,000	-2,17	-2,50	0,33	2,27
694,100	-2,05	-2,50	0,45	2,78
694,200	-1,95	-2,50	0,55	5,10
694,300	-1,85	-2,50	0,65	7,79
694,400	-1,79	-2,50	0,71	9,62
694,500	-1,84	-2,50	0,66	9,06
694,600	-1,94	-2,50	0,56	7,64
694,700	-2,08	-2,50	0,42	4,13
694,800	-2,28	-2,50	0,22	1,93
694,900	-2,43	-2,50	0,07	0,08
705,100	-2,41	-2,50	0,09	0,27
705,300	-2,43	-2,50	0,07	0,14
705,400	-2,49	-2,50	0,01	0,00
706,000	-2,48	-2,50	0,02	0,01
708,600	-2,41	-2,50	0,09	0,31
708,700	-2,19	-2,50	0,31	1,88
708,800	-2,01	-2,50	0,49	5,17
708,900	-2,06	-2,50	0,44	4,27
709,000	-2,16	-2,50	0,34	2,71
709,100	-2,35	-2,50	0,15	0,61
710,900	-2,40	-2,50	0,10	0,17
711,000	-2,08	-2,50	0,42	2,12
711,100	-1,80	-2,50	0,70	5,78
711,200	-1,68	-2,50	0,82	8,42
711,300	-1,75	-2,50	0,75	8,21
711,400	-1,74	-2,50	0,76	7,44
711,500	-1,90	-2,50	0,60	4,40
711,600	-1,96	-2,50	0,54	3,58
711,700	-2,00	-2,50	0,50	3,18
711,800	-1,95	-2,50	0,55	4,72
711,900	-1,89	-2,50	0,61	5,22
712,000	-1,78	-2,50	0,72	8,21
712,100	-1,69	-2,50	0,81	10,51
712,200	-1,68	-2,50	0,82	10,56
712,300	-1,68	-2,50	0,82	10,74
712,400	-1,66	-2,50	0,84	11,27
712,500	-1,60	-2,50	0,90	12,22
712,600	-1,69	-2,50	0,81	9,47
712,700	-1,84	-2,50	0,66	7,27
712,800	-1,96	-2,50	0,54	5,83
712,900	-2,08	-2,50	0,42	4,89
713,000	-2,12	-2,50	0,38	5,12
713,100	-2,29	-2,50	0,21	2,39

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
713,200	-2,44	-2,50	0,06	0,05
715,700	-2,39	-2,50	0,11	0,25
715,800	-2,22	-2,50	0,28	1,31
715,900	-1,98	-2,50	0,52	4,43
716,000	-1,89	-2,50	0,61	6,00
716,100	-1,65	-2,50	0,85	10,05
716,200	-1,62	-2,50	0,88	13,37
716,300	-1,70	-2,50	0,80	12,81
716,400	-1,65	-2,50	0,85	13,89
716,500	-1,63	-2,50	0,87	13,31
716,600	-2,00	-2,50	0,50	6,78
716,700	-2,16	-2,50	0,34	3,90
716,800	-2,25	-2,50	0,25	2,31
720,300	-2,46	-2,50	0,04	0,05
722,400	-2,30	-2,50	0,20	0,29
722,500	-2,27	-2,50	0,23	0,54
723,200	-2,30	-2,50	0,20	0,54
723,300	-2,30	-2,50	0,20	0,38
727,100	-2,38	-2,50	0,12	0,17
727,200	-2,21	-2,50	0,29	0,84
727,300	-1,92	-2,50	0,58	4,55
727,400	-1,63	-2,50	0,87	8,89
727,500	-1,37	-2,50	1,13	16,61
727,600	-1,25	-2,50	1,25	15,72
727,700	-1,31	-2,50	1,19	16,75
727,800	-1,41	-2,50	1,09	13,91
727,900	-1,53	-2,50	0,97	10,50
728,000	-1,77	-2,50	0,73	6,16
728,100	-1,87	-2,50	0,63	5,25
728,200	-1,97	-2,50	0,53	4,30
728,300	-1,97	-2,50	0,53	3,80
728,400	-2,13	-2,50	0,37	1,93
728,500	-2,25	-2,50	0,25	0,87
728,600	-2,43	-2,50	0,07	0,11
728,900	-2,47	-2,50	0,03	0,02
729,000	-2,46	-2,50	0,04	0,02
732,000	-2,46	-2,50	0,04	0,05
732,100	-2,24	-2,50	0,26	0,92
732,200	-2,27	-2,50	0,23	1,03
732,300	-2,28	-2,50	0,22	0,62
732,400	-2,23	-2,50	0,27	0,94
732,600	-2,36	-2,50	0,14	0,22
732,700	-2,39	-2,50	0,11	0,21
736,700	-2,31	-2,50	0,19	0,53
736,800	-2,28	-2,50	0,22	0,91

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
736,900	-2,27	-2,50	0,23	0,93
737,000	-2,33	-2,50	0,17	0,51
737,200	-2,43	-2,50	0,07	0,15
742,100	-2,37	-2,50	0,13	0,46
742,200	-2,25	-2,50	0,25	1,28
742,300	-2,32	-2,50	0,18	1,01
742,400	-2,19	-2,50	0,31	3,24
742,500	-2,40	-2,50	0,10	1,53
743,500	-2,48	-2,50	0,02	0,02
743,600	-2,02	-2,50	0,48	2,47
743,700	-1,96	-2,50	0,54	2,31
743,800	-2,21	-2,50	0,29	0,96
743,900	-2,09	-2,50	0,41	1,65
744,000	-2,26	-2,50	0,24	0,59
744,100	-2,31	-2,50	0,19	0,40
745,700	-2,46	-2,50	0,04	0,01
745,800	-2,31	-2,50	0,19	0,93
745,900	-2,36	-2,50	0,14	0,67
746,000	-2,45	-2,50	0,05	0,05
748,100	-2,44	-2,50	0,06	0,11
748,200	-2,48	-2,50	0,02	0,01
756,700	-2,47	-2,50	0,03	0,02
756,800	-2,47	-2,50	0,03	0,01
766,200	-2,43	-2,50	0,07	0,12
770,100	-2,48	-2,50	0,02	0,01
773,600	-2,43	-2,50	0,07	0,14
773,700	-2,43	-2,50	0,07	0,14
774,800	-2,39	-2,50	0,11	0,21
774,900	-2,45	-2,50	0,05	0,05
779,400	-2,45	-2,50	0,05	0,11
779,500	-2,48	-2,50	0,02	0,00
790,000	-2,49	-2,50	0,01	0,00
790,100	-2,48	-2,50	0,02	0,00
790,200	-2,47	-2,50	0,03	0,02
825,300	-2,47	-2,50	0,03	0,02
832,900	-2,36	-2,50	0,14	0,22
851,300	-2,23	-2,50	0,27	0,42

Anlage 2

Tabellenwerte zu Bild 7

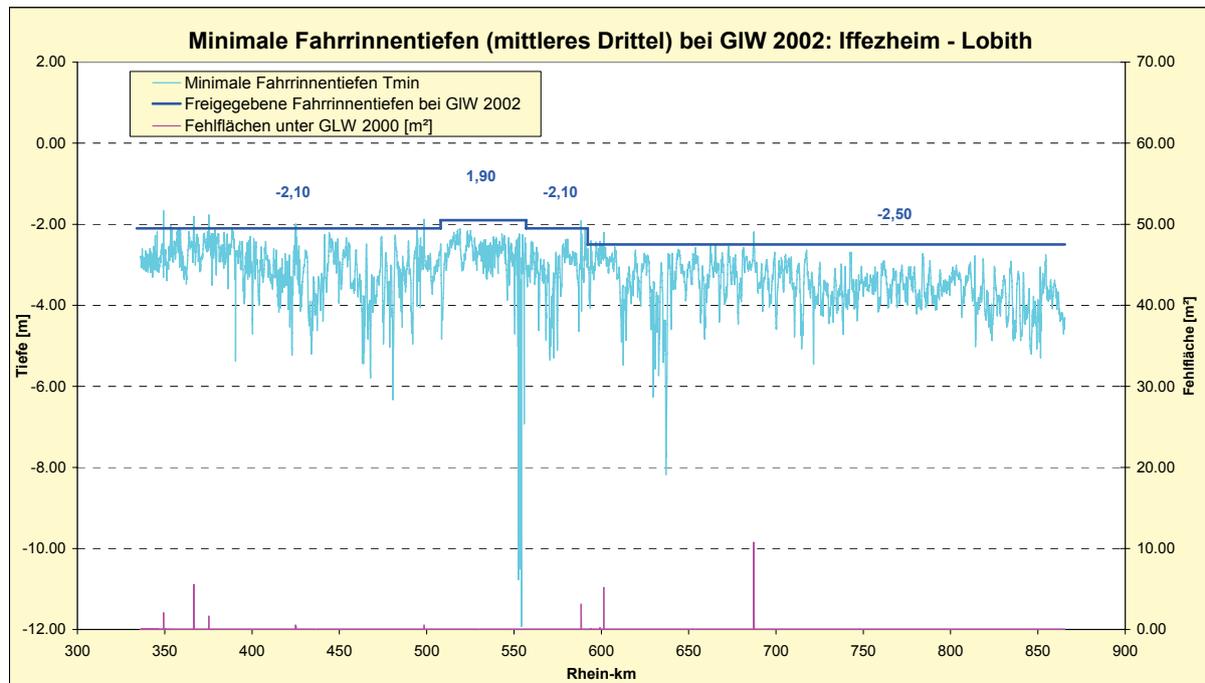


Bild 7: *Fehltiefen und Fehlflächen im mittleren Drittel der Fahrrinne*

Tabellenwerte zu Bild 7

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
349,230	-1,66	-2,10	0,44	2,06
353,400	-2,04	-2,10	0,06	0,05
366,500	-2,01	-2,10	0,09	0,63
366,600	-1,86	-2,10	0,24	4,96
366,700	-1,81	-2,10	0,29	5,54
366,800	-1,81	-2,10	0,29	4,88
366,900	-1,91	-2,10	0,19	0,91
375,300	-1,77	-2,10	0,33	1,63
424,700	-2,09	-2,10	0,01	0,01
424,900	-2,00	-2,10	0,10	0,53
425,200	-2,00	-2,10	0,10	0,38
498,400	-2,01	-2,10	0,09	0,04
498,500	-1,88	-2,10	0,22	0,53
588,500	-1,91	-2,10	0,19	3,13
594,100	-2,41	-2,50	0,09	0,13
597,000	-2,44	-2,50	0,06	0,01
599,100	-2,44	-2,50	0,06	0,17
599,200	-2,42	-2,50	0,08	0,22
601,000	-2,47	-2,50	0,03	0,03
601,400	-2,20	-2,50	0,30	5,18
687,100	-2,46	-2,50	0,04	0,09
687,200	-2,36	-2,50	0,14	1,65
687,300	-2,22	-2,50	0,28	10,75
687,400	-2,19	-2,50	0,31	9,24
687,500	-2,35	-2,50	0,15	3,55
687,600	-2,42	-2,50	0,08	0,29

Anlage 3

Tabellenwerte zu Bild 8

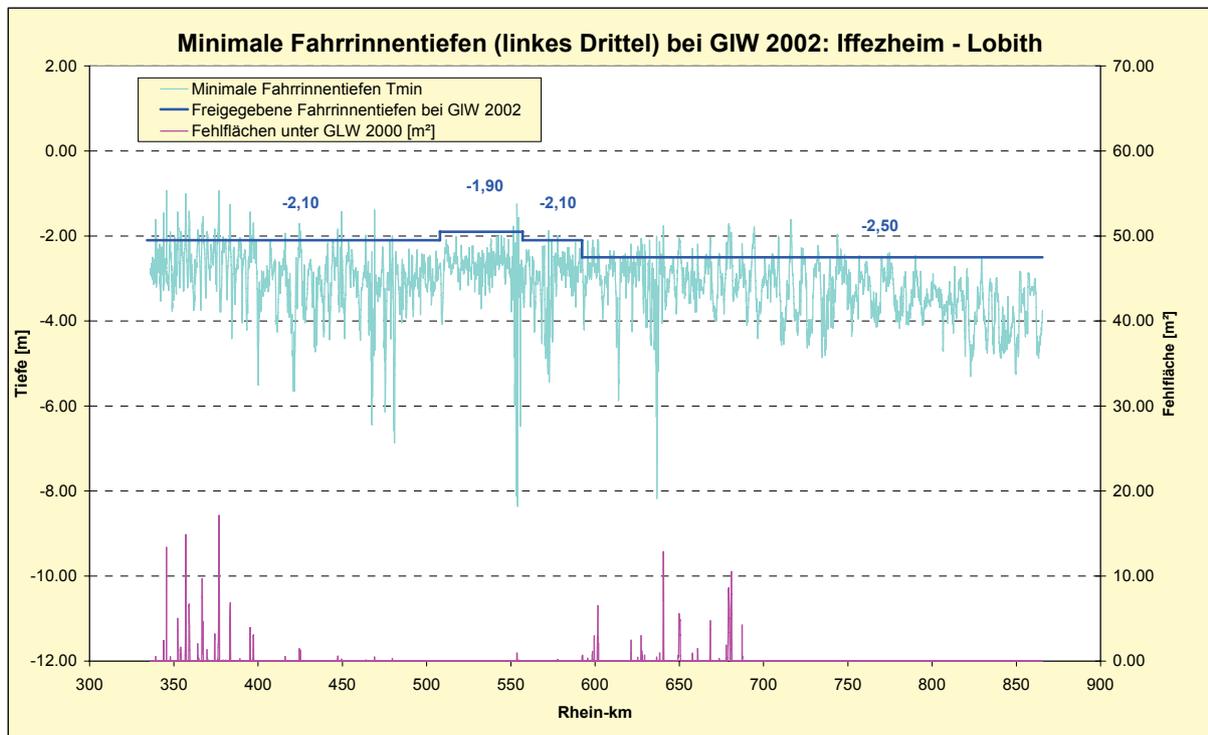


Bild 8: *Fehltiefen und Fehlflächen im linken Drittel der Fahrrinne*

Tabellenwerte zu Bild 8

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
339,330	-1,61	-2,10	0,49	0,53
339,650	-2,05	-2,10	0,05	0,03
344,030	-1,46	-2,10	0,64	2,40
345,700	-0,93	-2,10	1,17	13,37
347,830	-2,06	-2,10	0,04	0,03
347,920	-1,91	-2,10	0,19	0,51
350,480	-2,03	-2,10	0,07	0,06
352,200	-2,07	-2,10	0,03	0,04
352,300	-1,44	-2,10	0,66	5,02
352,400	-1,57	-2,10	0,53	3,61
352,500	-1,69	-2,10	0,41	2,10
352,600	-1,79	-2,10	0,31	1,86
352,700	-1,89	-2,10	0,21	1,31
352,800	-1,81	-2,10	0,29	1,28
354,100	-1,90	-2,10	0,20	1,62
354,200	-2,00	-2,10	0,10	0,50
354,300	-1,95	-2,10	0,15	0,93
354,400	-2,09	-2,10	0,01	0,01
356,700	-1,89	-2,10	0,21	0,68
356,800	-1,88	-2,10	0,22	1,60
356,900	-1,62	-2,10	0,48	3,36
357,000	-1,13	-2,10	0,97	13,94
357,100	-1,01	-2,10	1,09	13,21
357,200	-1,04	-2,10	1,06	14,86
357,300	-1,38	-2,10	0,72	10,08
357,400	-1,77	-2,10	0,33	2,90
358,900	-1,88	-2,10	0,22	1,29
359,000	-1,54	-2,10	0,56	6,49
359,100	-1,42	-2,10	0,68	6,69
359,200	-1,55	-2,10	0,55	4,56
359,300	-1,58	-2,10	0,52	4,06
359,400	-1,69	-2,10	0,41	2,32
359,500	-1,86	-2,10	0,24	1,24
364,200	-1,86	-2,10	0,24	2,05
364,300	-1,94	-2,10	0,16	0,65
364,400	-2,03	-2,10	0,07	0,16
364,500	-1,98	-2,10	0,12	0,44
364,700	-2,01	-2,10	0,09	0,32
366,600	-1,90	-2,10	0,20	2,53

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
366,700	-1,76	-2,10	0,34	7,52
366,800	-1,70	-2,10	0,40	9,70
366,900	-1,74	-2,10	0,36	8,65
367,000	-1,89	-2,10	0,21	2,76
367,100	-1,87	-2,10	0,23	1,98
367,200	-1,88	-2,10	0,22	1,47
367,300	-1,86	-2,10	0,24	0,85
367,400	-1,54	-2,10	0,56	4,64
367,500	-1,98	-2,10	0,12	0,37
369,700	-1,90	-2,10	0,20	1,34
369,800	-1,92	-2,10	0,18	0,44
369,900	-1,99	-2,10	0,11	0,34
370,000	-1,98	-2,10	0,12	0,17
370,100	-1,97	-2,10	0,13	0,18
370,200	-2,04	-2,10	0,06	0,04
374,000	-2,09	-2,10	0,01	0,01
374,100	-2,03	-2,10	0,07	0,10
374,200	-1,84	-2,10	0,26	2,20
374,300	-1,84	-2,10	0,26	3,20
374,400	-1,87	-2,10	0,23	2,53
376,100	-1,92	-2,10	0,18	0,21
376,300	-1,83	-2,10	0,27	1,58
376,400	-1,74	-2,10	0,36	1,91
376,500	-1,64	-2,10	0,46	3,11
376,600	-1,29	-2,10	0,81	8,22
376,700	-1,53	-2,10	0,57	3,20
376,800	-0,94	-2,10	1,16	17,13
376,900	-1,27	-2,10	0,83	8,63
377,000	-0,97	-2,10	1,13	8,00
379,200	-2,05	-2,10	0,05	0,11
379,300	-2,02	-2,10	0,08	0,05
380,700	-2,06	-2,10	0,04	0,12
380,800	-2,08	-2,10	0,02	0,04
383,000	-2,03	-2,10	0,07	0,14
383,100	-1,80	-2,10	0,30	1,55
383,200	-1,61	-2,10	0,49	2,90
383,300	-1,52	-2,10	0,58	5,19
383,400	-1,26	-2,10	0,84	5,80
383,500	-1,36	-2,10	0,74	6,84
383,600	-1,66	-2,10	0,44	1,87
389,100	-2,04	-2,10	0,06	0,27
389,200	-2,07	-2,10	0,03	0,04
395,000	-2,08	-2,10	0,02	0,02
395,100	-1,52	-2,10	0,58	3,43

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
395,200	-1,44	-2,10	0,66	3,93
395,300	-1,47	-2,10	0,63	3,27
396,500	-1,99	-2,10	0,11	0,12
396,900	-2,03	-2,10	0,07	0,07
397,000	-1,97	-2,10	0,13	0,38
397,100	-1,88	-2,10	0,22	1,33
397,200	-1,75	-2,10	0,35	2,95
397,300	-1,69	-2,10	0,41	3,08
397,400	-1,86	-2,10	0,24	0,66
416,000	-2,05	-2,10	0,05	0,03
416,100	-1,94	-2,10	0,16	0,53
424,400	-1,82	-2,10	0,28	1,02
424,500	-1,71	-2,10	0,39	1,43
424,600	-2,03	-2,10	0,07	0,45
425,200	-1,89	-2,10	0,21	1,25
447,000	-1,99	-2,10	0,11	0,11
447,100	-2,08	-2,10	0,02	0,03
447,200	-1,95	-2,10	0,15	0,29
447,300	-1,84	-2,10	0,26	0,57
447,400	-1,92	-2,10	0,18	0,53
449,600	-1,43	-2,10	0,67	0,21
463,900	-2,00	-2,10	0,10	0,12
464,000	-1,98	-2,10	0,12	0,12
469,100	-1,39	-2,10	0,71	0,48
479,600	-2,09	-2,10	0,01	0,01
479,700	-2,00	-2,10	0,10	0,31
551,500	-1,77	-1,90	0,13	0,04
553,600	-1,25	-1,90	0,65	0,95
553,700	-1,69	-1,90	0,21	0,81
554,500	-1,57	-1,90	0,33	0,11
577,900	-1,99	-2,10	0,11	0,20
578,000	-2,59	-2,10	-0,49	0,00
592,300	-2,25	-2,50	0,25	0,61
592,400	-2,13	-2,50	0,37	0,02
592,500	-2,26	-2,50	0,24	0,69
595,500	-2,37	-2,50	0,13	0,01
595,600	-2,12	-2,50	0,38	0,32

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
595,800	-2,38	-2,50	0,12	0,04
598,200	-2,38	-2,50	0,12	0,07
598,300	-2,30	-2,50	0,20	0,63
598,400	-2,24	-2,50	0,26	1,15
598,500	-2,10	-2,50	0,40	0,01
598,600	-2,33	-2,50	0,17	0,01
599,200	-2,48	-2,50	0,02	0,01
599,300	-2,41	-2,50	0,09	0,17
599,400	-2,45	-2,50	0,05	0,04
599,500	-2,27	-2,50	0,23	2,98
599,600	-2,65	-2,50	-0,15	0,00
601,400	-2,30	-2,50	0,20	1,62
601,500	-2,21	-2,50	0,29	2,90
601,600	-2,18	-2,50	0,32	2,32
601,700	-2,09	-2,50	0,41	6,54
602,000	-2,12	-2,50	0,38	2,14
608,800	-2,35	-2,50	0,15	0,01
610,200	-2,46	-2,50	0,04	0,01
611,200	-2,36	-2,50	0,14	0,01
611,300	-2,41	-2,50	0,09	0,03
619,300	-2,48	-2,50	0,02	0,01
621,100	-2,40	-2,50	0,10	0,08
621,200	-2,25	-2,50	0,25	0,89
621,300	-2,19	-2,50	0,31	2,44
625,000	-2,38	-2,50	0,12	0,02
625,100	-2,38	-2,50	0,12	0,06
625,200	-2,48	-2,50	0,02	0,01
625,300	-2,24	-2,50	0,26	0,43
625,400	-2,35	-2,50	0,15	0,01
625,700	-2,40	-2,50	0,10	0,01
626,500	-2,36	-2,50	0,14	0,03
627,100	-2,39	-2,50	0,11	0,01
627,200	-2,34	-2,50	0,16	0,28
627,300	-2,06	-2,50	0,44	2,99
627,500	-2,09	-2,50	0,41	0,61
627,600	-2,37	-2,50	0,13	0,19
627,700	-2,19	-2,50	0,31	1,21
627,900	-2,24	-2,50	0,26	0,74
629,400	-2,20	-2,50	0,30	0,68

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
632,400	-2,10	-2,50	0,40	0,01
632,500	-2,31	-2,50	0,19	0,01
636,600	-2,01	-2,50	0,49	0,46
638,200	-2,34	-2,50	0,16	0,04
638,300	-2,14	-2,50	0,36	0,23
638,400	-2,27	-2,50	0,23	0,96
639,200	-2,42	-2,50	0,08	0,02
639,300	-2,48	-2,50	0,02	0,00
640,300	-2,45	-2,50	0,05	0,03
640,400	-1,92	-2,50	0,58	7,13
640,500	-1,78	-2,50	0,72	12,88
640,600	-1,76	-2,50	0,74	10,75
640,700	-2,07	-2,50	0,43	2,16
640,800	-2,46	-2,50	0,04	0,06
649,300	-2,36	-2,50	0,14	0,46
649,400	-2,39	-2,50	0,11	0,61
649,500	-2,39	-2,50	0,11	0,49
649,600	-2,43	-2,50	0,07	0,44
649,700	-2,27	-2,50	0,23	1,65
649,800	-2,17	-2,50	0,33	4,17
649,900	-2,05	-2,50	0,45	5,57
650,000	-2,09	-2,50	0,41	4,63
650,100	-2,14	-2,50	0,36	3,87
650,200	-2,10	-2,50	0,40	4,96
650,300	-2,16	-2,50	0,34	4,78
650,400	-2,10	-2,50	0,40	4,84
650,500	-2,16	-2,50	0,34	4,82
650,600	-2,25	-2,50	0,25	3,06
650,700	-2,40	-2,50	0,10	0,61
650,800	-2,41	-2,50	0,09	0,14
650,900	-2,48	-2,50	0,02	0,02
657,600	-2,45	-2,50	0,05	0,05
657,700	-2,30	-2,50	0,20	0,93
657,800	-2,37	-2,50	0,13	0,67
657,900	-2,36	-2,50	0,14	0,44
660,800	-2,34	-2,50	0,16	0,46
660,900	-2,19	-2,50	0,31	1,48
661,000	-2,26	-2,50	0,24	1,10
661,100	-2,44	-2,50	0,06	0,12
665,300	-2,48	-2,50	0,02	0,02
666,100	-2,43	-2,50	0,07	0,05
666,200	-2,46	-2,50	0,04	0,05
668,100	-2,35	-2,50	0,15	0,12

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
668,200	-2,26	-2,50	0,24	0,76
668,300	-2,18	-2,50	0,32	1,81
668,400	-2,04	-2,50	0,46	3,73
668,500	-2,09	-2,50	0,41	4,74
673,600	-2,41	-2,50	0,09	0,30
673,800	-2,47	-2,50	0,03	0,01
673,900	-2,44	-2,50	0,06	0,12
677,700	-2,35	-2,50	0,15	0,21
677,800	-2,16	-2,50	0,34	1,88
678,600	-2,41	-2,50	0,09	0,22
678,700	-2,37	-2,50	0,13	0,40
678,800	-2,14	-2,50	0,36	1,74
678,900	-2,16	-2,50	0,34	1,84
679,000	-2,08	-2,50	0,42	2,86
679,100	-1,87	-2,50	0,63	7,26
679,200	-1,78	-2,50	0,72	8,28
679,300	-1,76	-2,50	0,74	8,62
679,400	-1,71	-2,50	0,79	7,96
679,500	-1,84	-2,50	0,66	7,05
679,600	-1,78	-2,50	0,72	6,58
679,700	-1,92	-2,50	0,58	6,05
679,800	-1,90	-2,50	0,60	5,05
679,900	-1,97	-2,50	0,53	3,36
680,000	-2,38	-2,50	0,12	0,29
680,400	-2,35	-2,50	0,15	0,38
680,500	-2,20	-2,50	0,30	1,39
680,600	-2,05	-2,50	0,45	3,00
680,700	-2,01	-2,50	0,49	5,03
680,800	-1,92	-2,50	0,58	9,55
680,900	-1,93	-2,50	0,57	10,52
681,000	-2,01	-2,50	0,49	7,87
681,100	-2,15	-2,50	0,35	5,54
681,200	-2,33	-2,50	0,17	1,95
687,300	-2,18	-2,50	0,32	4,25
687,400	-2,39	-2,50	0,11	0,29
687,500	-2,42	-2,50	0,08	0,56
693,100	-2,48	-2,50	0,02	0,01
693,200	-2,35	-2,50	0,15	0,34
693,300	-2,26	-2,50	0,24	0,95
693,400	-2,21	-2,50	0,29	1,19
693,500	-2,29	-2,50	0,21	0,66
693,600	-2,26	-2,50	0,24	0,77
693,700	-2,27	-2,50	0,23	0,98
693,800	-2,16	-2,50	0,34	1,58
693,900	-1,96	-2,50	0,54	3,80
694,000	-2,17	-2,50	0,33	2,27
694,100	-2,05	-2,50	0,45	2,78

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
694,200	-1,95	-2,50	0,55	5,10
694,300	-1,85	-2,50	0,65	7,79
694,400	-1,79	-2,50	0,71	9,62
694,500	-1,84	-2,50	0,66	9,06
694,600	-1,94	-2,50	0,56	7,64
694,700	-2,08	-2,50	0,42	4,13
694,800	-2,28	-2,50	0,22	1,93
694,900	-2,43	-2,50	0,07	0,08
705,100	-2,41	-2,50	0,09	0,27
705,300	-2,43	-2,50	0,07	0,14
706,000	-2,48	-2,50	0,02	0,01
708,600	-2,41	-2,50	0,09	0,31
708,700	-2,19	-2,50	0,31	1,88
708,800	-2,01	-2,50	0,49	5,17
708,900	-2,06	-2,50	0,44	4,27
709,000	-2,16	-2,50	0,34	2,71
709,100	-2,35	-2,50	0,15	0,61
715,400	-2,45	-2,50	0,05	0,02
715,700	-2,39	-2,50	0,11	0,25
715,800	-2,22	-2,50	0,28	1,31
715,900	-1,98	-2,50	0,52	4,43
716,000	-1,89	-2,50	0,61	6,00
716,100	-1,65	-2,50	0,85	10,05
716,200	-1,62	-2,50	0,88	13,37
716,300	-1,70	-2,50	0,80	12,81
716,400	-1,65	-2,50	0,85	13,89
716,500	-1,63	-2,50	0,87	13,31
716,600	-2,00	-2,50	0,50	6,78
716,700	-2,16	-2,50	0,34	3,90
716,800	-2,25	-2,50	0,25	2,31
722,400	-2,30	-2,50	0,20	0,29
722,500	-2,27	-2,50	0,23	0,54
723,200	-2,30	-2,50	0,20	0,54
723,300	-2,30	-2,50	0,20	0,38
723,400	-2,51	-2,50	-0,01	0,00
732,000	-2,46	-2,50	0,04	0,05
732,100	-2,24	-2,50	0,26	0,92
732,200	-2,27	-2,50	0,23	1,03
732,300	-2,28	-2,50	0,22	0,62
732,400	-2,23	-2,50	0,27	0,94
732,600	-2,36	-2,50	0,14	0,22
732,700	-2,39	-2,50	0,11	0,21
743,500	-2,48	-2,50	0,02	0,02

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
743,600	-2,02	-2,50	0,48	2,47
743,700	-1,96	-2,50	0,54	2,31
743,800	-2,21	-2,50	0,29	0,96
743,900	-2,09	-2,50	0,41	1,65
744,000	-2,26	-2,50	0,24	0,59
744,100	-2,31	-2,50	0,19	0,40
745,700	-2,46	-2,50	0,04	0,01
745,800	-2,31	-2,50	0,19	0,93
745,900	-2,36	-2,50	0,14	0,67
746,000	-2,45	-2,50	0,05	0,05
748,100	-2,44	-2,50	0,06	0,11
748,200	-2,48	-2,50	0,02	0,01
756,700	-2,47	-2,50	0,03	0,02
756,800	-2,47	-2,50	0,03	0,01
770,100	-2,48	-2,50	0,02	0,01
773,600	-2,43	-2,50	0,07	0,14
773,700	-2,43	-2,50	0,07	0,14
774,800	-2,39	-2,50	0,11	0,21
774,900	-2,45	-2,50	0,05	0,05
790,200	-2,47	-2,50	0,03	0,02

Anlage 4

Tabellenwerte zu Bild 9

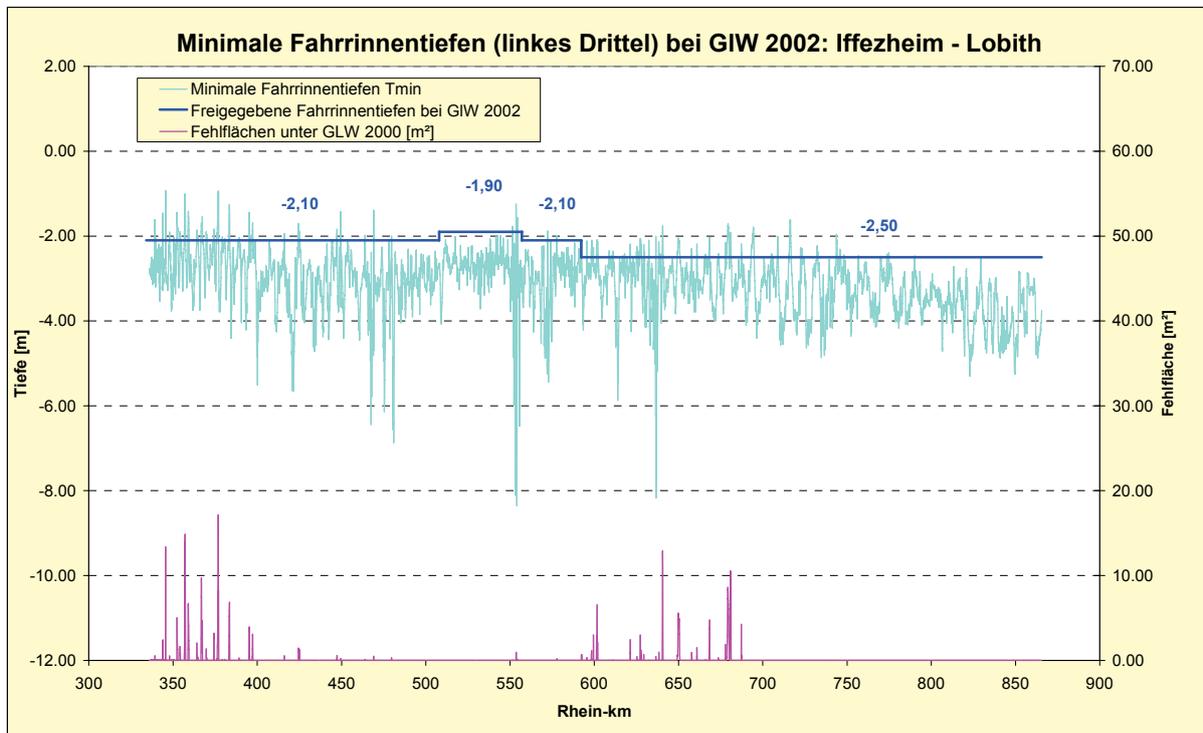


Bild 9: *Fehltiefen und Fehlflächen im rechten Drittel der Fahrrinne*

Tabellenwerte zu Bild 9

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
348,800	-2,01	-2,10	0,09	0,14
348,820	-1,85	-2,10	0,25	1,27
348,840	-1,92	-2,10	0,18	0,69
348,880	-1,84	-2,10	0,26	1,26
348,900	-1,73	-2,10	0,37	2,10
348,920	-1,65	-2,10	0,45	2,95
348,940	-1,61	-2,10	0,49	2,81
348,970	-1,44	-2,10	0,66	4,37
349,000	-1,77	-2,10	0,33	1,35
349,030	-1,59	-2,10	0,51	2,52
349,060	-1,81	-2,10	0,29	1,01
349,080	-1,75	-2,10	0,35	1,21
349,100	-1,77	-2,10	0,33	1,01
349,140	-1,77	-2,10	0,33	1,16
349,160	-1,91	-2,10	0,19	0,49
349,180	-2,01	-2,10	0,09	0,07
349,230	-0,67	-2,10	1,43	31,50
349,260	-1,12	-2,10	0,98	11,12
349,280	-1,20	-2,10	0,90	8,51
349,300	-1,54	-2,10	0,56	3,64
349,320	-1,51	-2,10	0,59	3,86
349,340	-2,36	-2,10	-0,26	0,00
350,000	-2,07	-2,10	0,03	0,02
350,020	-2,05	-2,10	0,05	0,09
350,040	-1,95	-2,10	0,15	0,67
350,080	-1,98	-2,10	0,12	0,27
350,100	-2,02	-2,10	0,08	0,07
350,120	-1,99	-2,10	0,11	0,39
350,140	-2,03	-2,10	0,07	0,05
353,000	-2,07	-2,10	0,03	0,01
353,100	-2,09	-2,10	0,01	0,01
353,200	-1,63	-2,10	0,47	4,11
353,300	-1,44	-2,10	0,66	6,57
353,400	-0,98	-2,10	1,12	13,85
353,500	-1,35	-2,10	0,75	8,53
353,600	-1,67	-2,10	0,43	3,65
353,700	-2,00	-2,10	0,10	0,11
355,500	-2,07	-2,10	0,03	0,04
355,700	-1,94	-2,10	0,16	0,19
355,800	-2,00	-2,10	0,10	0,31
355,900	-1,89	-2,10	0,21	1,26
357,700	-1,96	-2,10	0,14	0,67
357,800	-1,87	-2,10	0,23	2,15
357,900	-1,64	-2,10	0,46	4,93
358,000	-1,49	-2,10	0,61	9,39
358,100	-1,36	-2,10	0,74	11,90

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
358,200	-1,85	-2,10	0,25	2,19
365,500	-2,04	-2,10	0,06	0,103
365,600	-1,85	-2,10	0,25	1,52
365,700	-1,71	-2,10	0,39	2,86
365,800	-2,01	-2,10	0,09	0,12
365,900	-1,94	-2,10	0,16	0,67
366,000	-1,45	-2,10	0,65	5,30
366,100	-1,55	-2,10	0,55	2,89
366,200	-1,70	-2,10	0,40	1,61
366,300	-1,88	-2,10	0,22	0,72
366,400	-2,09	-2,10	0,01	0,03
366,600	-1,98	-2,10	0,12	0,36
366,700	-2,00	-2,10	0,10	0,51
366,800	-1,99	-2,10	0,11	0,24
368,500	-1,98	-2,10	0,12	0,75
368,600	-1,94	-2,10	0,16	0,52
368,700	-1,80	-2,10	0,30	1,41
368,800	-1,65	-2,10	0,45	5,33
368,900	-1,38	-2,10	0,72	8,62
369,000	-1,51	-2,10	0,59	8,56
373,000	-1,97	-2,10	0,13	0,60
373,100	-1,97	-2,10	0,13	0,38
373,200	-1,99	-2,10	0,11	0,34
375,100	-2,06	-2,10	0,04	0,04
375,200	-1,71	-2,10	0,39	3,77
375,300	-1,24	-2,10	0,86	19,43
375,400	-1,46	-2,10	0,64	9,08
375,500	-1,87	-2,10	0,23	2,86
377,400	-1,57	-2,10	0,53	2,97
377,500	-1,33	-2,10	0,77	5,82
377,600	-1,10	-2,10	1,00	15,12
377,700	-0,97	-2,10	1,13	15,15
377,800	-1,55	-2,10	0,55	3,57
377,900	-1,53	-2,10	0,57	4,25
378,000	-1,86	-2,10	0,24	1,00
378,100	-1,86	-2,10	0,24	0,92
378,200	-2,02	-2,10	0,08	0,12
378,300	-1,95	-2,10	0,15	0,53
378,400	-1,91	-2,10	0,19	0,91
378,500	-1,93	-2,10	0,17	0,93
378,600	-2,00	-2,10	0,10	0,99
378,700	-2,05	-2,10	0,05	0,13
384,000	-1,83	-2,10	0,27	1,24
384,100	-1,62	-2,10	0,48	3,93
384,200	-1,56	-2,10	0,54	5,18
384,300	-1,35	-2,10	0,75	8,85

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
384,400	-1,47	-2,10	0,63	5,35
384,500	-1,38	-2,10	0,72	8,16
384,600	-1,88	-2,10	0,22	0,27
384,700	-2,02	-2,10	0,08	0,19
389,200	-1,84	-2,10	0,26	2,63
392,900	-2,00	-2,10	0,10	0,14
393,000	-1,91	-2,10	0,19	0,75
393,100	-1,97	-2,10	0,13	0,37
393,200	-1,93	-2,10	0,17	0,59
393,300	-1,95	-2,10	0,15	0,27
393,400	-2,10	-2,10	0,00	0,01
394,000	-2,02	-2,10	0,08	0,18
399,600	-2,03	-2,10	0,07	0,02
399,700	-1,48	-2,10	0,62	6,77
399,800	-1,00	-2,10	1,10	10,66
399,900	-1,63	-2,10	0,47	1,25
400,000	-1,81	-2,10	0,29	0,79
401,100	-1,98	-2,10	0,12	0,46
401,200	-2,02	-2,10	0,08	0,19
421,400	-1,82	-2,10	0,28	1,83
421,500	-1,88	-2,10	0,22	0,79
426,700	-1,90	-2,10	0,20	2,30
434,000	-1,92	-2,10	0,18	0,16
451,600	-2,03	-2,10	0,07	0,07
451,700	-2,02	-2,10	0,08	0,17
500,500	-1,63	-2,10	0,47	0,01
543,000	-1,85	-1,90	0,05	0,02
573,400	-2,03	-2,10	0,07	0,02
573,500	-1,93	-2,10	0,17	0,28
585,700	-2,01	-2,10	0,09	0,07
586,700	-2,03	-2,10	0,07	0,09
586,900	-1,95	-2,10	0,15	0,26
590,200	-1,91	-2,10	0,19	0,16
590,300	-1,79	-2,10	0,31	2,20
590,800	-2,03	-2,10	0,07	0,04
591,200	-1,91	-2,10	0,19	0,41

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
593,500	-2,48	-2,50	0,02	0,01
594,000	-1,87	-2,50	0,63	17,33
594,100	-1,57	-2,50	0,93	25,19
594,200	-1,97	-2,50	0,53	8,29
594,300	-2,04	-2,50	0,46	5,04
594,400	-2,23	-2,50	0,27	2,58
594,500	-2,05	-2,50	0,45	8,57
594,600	-2,35	-2,50	0,15	1,10
594,900	-2,22	-2,50	0,28	0,17
595,900	-1,92	-2,50	0,58	2,45
596,000	-2,24	-2,50	0,26	0,49
596,100	-2,35	-2,50	0,15	0,27
596,200	-2,18	-2,50	0,32	0,78
596,300	-2,22	-2,50	0,28	0,79
596,400	-2,35	-2,50	0,15	0,18
596,500	-2,16	-2,50	0,34	0,84
596,600	-2,11	-2,50	0,39	2,40
596,700	-2,11	-2,50	0,39	0,68
596,800	-1,97	-2,50	0,53	4,04
596,900	-2,36	-2,50	0,14	0,89
597,000	-2,14	-2,50	0,36	5,68
597,100	-1,90	-2,50	0,60	4,36
597,200	-2,08	-2,50	0,42	3,71
597,300	-2,12	-2,50	0,38	2,49
597,400	-2,45	-2,50	0,05	0,03
597,500	-2,11	-2,50	0,39	3,76
597,600	-2,34	-2,50	0,16	0,79
597,700	-2,07	-2,50	0,43	4,13
597,800	-2,03	-2,50	0,47	4,07
597,900	-2,05	-2,50	0,45	5,50
598,000	-2,24	-2,50	0,26	1,42
598,100	-2,13	-2,50	0,37	1,68
598,200	-2,24	-2,50	0,26	1,11
598,300	-2,16	-2,50	0,34	1,19
598,400	-1,88	-2,50	0,62	4,79
598,500	-1,62	-2,50	0,88	9,58
598,600	-1,65	-2,50	0,85	13,26
598,700	-2,13	-2,50	0,37	2,45
598,800	-2,45	-2,50	0,05	0,02
599,500	-2,37	-2,50	0,13	0,05
600,700	-2,41	-2,50	0,09	0,04
601,000	-2,28	-2,50	0,22	1,08
601,400	-2,19	-2,50	0,31	3,64
601,900	-2,12	-2,50	0,38	6,43
602,000	-2,22	-2,50	0,28	1,01
602,200	-2,03	-2,50	0,47	1,25
602,300	-2,24	-2,50	0,26	1,04
602,400	-2,11	-2,50	0,39	4,63
602,500	-1,99	-2,50	0,51	4,38

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
602,600	-1,55	-2,50	0,95	9,64
602,800	-1,81	-2,50	0,69	6,67
602,900	-2,44	-2,50	0,06	0,04
603,000	-2,37	-2,50	0,13	0,16
603,700	-2,23	-2,50	0,27	0,02
603,800	-2,11	-2,50	0,39	2,66
604,000	-2,30	-2,50	0,20	0,48
604,100	-2,47	-2,50	0,03	0,01
604,300	-2,44	-2,50	0,06	0,05
604,400	-2,39	-2,50	0,11	0,36
604,500	-2,29	-2,50	0,21	1,06
604,600	-2,29	-2,50	0,21	0,37
604,700	-2,40	-2,50	0,10	0,01
604,800	-2,32	-2,50	0,18	0,31
604,900	-2,31	-2,50	0,19	1,00
605,000	-2,38	-2,50	0,12	0,57
605,700	-2,32	-2,50	0,18	1,35
605,800	-2,31	-2,50	0,19	1,22
606,200	-2,00	-2,50	0,50	0,03
607,200	-2,25	-2,50	0,25	0,03
607,300	-1,92	-2,50	0,58	0,01
607,400	-1,42	-2,50	1,08	0,07
607,500	-1,07	-2,50	1,43	0,13
607,600	-1,37	-2,50	1,13	0,03
607,700	-1,56	-2,50	0,94	15,78
607,800	-1,69	-2,50	0,81	0,01
607,900	-1,93	-2,50	0,57	0,04
608,100	-1,95	-2,50	0,55	0,05
608,400	-2,39	-2,50	0,11	0,01
608,500	-2,32	-2,50	0,18	0,81
613,300	-2,39	-2,50	0,11	0,10
613,600	-2,35	-2,50	0,15	0,51
613,700	-2,20	-2,50	0,30	2,66
613,800	-1,94	-2,50	0,56	5,71
614,000	-2,20	-2,50	0,30	0,76
616,700	-2,27	-2,50	0,23	1,05
616,800	-1,77	-2,50	0,73	6,77
616,900	-1,40	-2,50	1,10	11,13
617,000	-1,43	-2,50	1,07	10,25
617,100	-1,35	-2,50	1,15	10,66
617,200	-1,41	-2,50	1,09	9,34
617,300	-1,84	-2,50	0,66	4,10
623,700	-2,36	-2,50	0,14	0,26
623,800	-2,17	-2,50	0,33	3,49
623,900	-2,12	-2,50	0,38	4,37
624,000	-2,17	-2,50	0,33	2,58

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
624,100	-2,21	-2,50	0,29	1,90
624,200	-2,37	-2,50	0,13	0,34
624,300	-2,30	-2,50	0,20	0,65
624,400	-2,15	-2,50	0,35	4,02
624,500	-2,02	-2,50	0,48	7,06
624,600	-2,36	-2,50	0,14	1,82
624,700	-2,48	-2,50	0,02	0,01
624,800	-2,35	-2,50	0,15	1,46
624,900	-2,42	-2,50	0,08	0,26
625,000	-2,38	-2,50	0,12	0,58
625,100	-2,39	-2,50	0,11	0,41
625,200	-2,46	-2,50	0,04	0,02
625,500	-2,47	-2,50	0,03	0,02
625,600	-2,23	-2,50	0,27	2,81
625,700	-2,20	-2,50	0,30	5,04
625,900	-2,23	-2,50	0,27	0,39
630,000	-2,37	-2,50	0,13	0,02
630,100	-2,40	-2,50	0,10	0,04
630,200	-2,21	-2,50	0,29	0,89
630,300	-2,47	-2,50	0,03	0,01
631,900	-1,74	-2,50	0,76	0,57
634,100	-2,34	-2,50	0,16	0,27
634,200	-2,18	-2,50	0,32	2,05
634,300	-2,02	-2,50	0,48	3,31
634,400	-2,35	-2,50	0,15	0,23
636,400	-2,39	-2,50	0,11	0,11
636,500	-2,12	-2,50	0,38	1,17
636,600	-1,99	-2,50	0,51	3,72
641,600	-2,12	-2,50	0,38	1,44
641,900	-2,41	-2,50	0,09	0,29
642,300	-2,37	-2,50	0,13	0,28
642,500	-2,21	-2,50	0,29	1,52
642,600	-2,31	-2,50	0,19	0,45
643,200	-2,47	-2,50	0,03	0,01
643,800	-2,49	-2,50	0,01	0,01
652,400	-2,43	-2,50	0,07	0,11
652,500	-2,28	-2,50	0,22	1,67
652,600	-2,10	-2,50	0,40	3,81
652,700	-1,96	-2,50	0,54	5,20
652,800	-1,94	-2,50	0,56	4,90
652,900	-2,02	-2,50	0,48	6,06
653,000	-2,29	-2,50	0,21	1,74
653,100	-2,40	-2,50	0,10	0,25
653,300	-2,46	-2,50	0,04	0,07

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
653,500	-2,42	-2,50	0,08	0,17
653,600	-2,38	-2,50	0,12	0,42
653,700	-2,25	-2,50	0,25	1,34
653,800	-2,34	-2,50	0,16	1,02
653,900	-2,24	-2,50	0,26	2,80
654,000	-2,41	-2,50	0,09	0,22
654,100	-2,46	-2,50	0,04	0,06
654,400	-2,30	-2,50	0,20	1,85
654,500	-2,20	-2,50	0,30	2,15
654,600	-2,16	-2,50	0,34	4,32
654,700	-2,14	-2,50	0,36	4,39
654,800	-1,99	-2,50	0,51	5,10
654,900	-1,88	-2,50	0,62	5,26
655,000	-2,11	-2,50	0,39	3,82
655,100	-2,27	-2,50	0,23	1,72
655,200	-2,25	-2,50	0,25	2,23
656,600	-2,44	-2,50	0,06	0,01
662,000	-2,46	-2,50	0,04	0,03
662,100	-2,31	-2,50	0,19	1,08
662,200	-2,25	-2,50	0,25	2,64
662,300	-2,48	-2,50	0,02	0,03
662,400	-2,42	-2,50	0,08	0,71
662,500	-2,42	-2,50	0,08	0,21
663,000	-2,48	-2,50	0,02	0,01
669,100	-2,48	-2,50	0,02	0,04
669,200	-2,45	-2,50	0,05	0,20
669,300	-2,32	-2,50	0,18	0,65
669,400	-2,22	-2,50	0,28	3,44
669,500	-2,31	-2,50	0,19	2,18
669,600	-2,42	-2,50	0,08	0,29
671,300	-2,35	-2,50	0,15	0,37
671,400	-2,27	-2,50	0,23	0,96
671,500	-2,14	-2,50	0,36	2,50
671,600	-2,14	-2,50	0,36	1,67
671,700	-2,26	-2,50	0,24	1,20
671,800	-2,42	-2,50	0,08	0,24
671,900	-2,19	-2,50	0,31	0,30
672,000	-2,26	-2,50	0,24	1,02
672,100	-1,99	-2,50	0,51	2,98
672,200	-1,75	-2,50	0,75	8,30
672,300	-1,59	-2,50	0,91	11,26
672,400	-1,75	-2,50	0,75	12,19
672,500	-1,75	-2,50	0,75	16,77
672,600	-1,65	-2,50	0,85	19,02
672,700	-1,52	-2,50	0,98	22,07
672,800	-1,56	-2,50	0,94	25,05
672,900	-1,59	-2,50	0,91	21,87

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
673,000	-2,06	-2,50	0,44	8,63
673,100	-2,43	-2,50	0,07	0,08
675,800	-2,42	-2,50	0,08	0,08
675,900	-2,47	-2,50	0,03	0,01
676,300	-2,38	-2,50	0,12	0,36
676,400	-2,29	-2,50	0,21	0,97
676,500	-2,28	-2,50	0,22	2,32
676,600	-2,25	-2,50	0,25	2,79
676,700	-2,32	-2,50	0,18	1,44
676,800	-2,36	-2,50	0,14	1,58
676,900	-2,42	-2,50	0,08	0,26
681,900	-2,32	-2,50	0,18	0,15
682,300	-2,30	-2,50	0,20	1,88
682,400	-1,76	-2,50	0,74	7,69
682,500	-1,97	-2,50	0,53	5,78
682,600	-2,18	-2,50	0,32	4,04
682,700	-2,37	-2,50	0,13	1,00
682,800	-2,39	-2,50	0,11	0,10
683,000	-2,42	-2,50	0,08	0,10
683,100	-2,19	-2,50	0,31	1,03
683,200	-2,19	-2,50	0,31	1,67
683,300	-2,31	-2,50	0,19	1,51
683,400	-2,23	-2,50	0,27	1,69
683,500	-2,31	-2,50	0,19	0,85
683,600	-2,42	-2,50	0,08	0,07
687,200	-2,41	-2,50	0,09	0,19
687,300	-2,18	-2,50	0,32	4,33
687,400	-2,35	-2,50	0,15	0,44
687,500	-2,41	-2,50	0,09	0,16
688,300	-2,42	-2,50	0,08	0,15
688,400	-2,10	-2,50	0,40	3,56
688,700	-2,23	-2,50	0,27	1,02
688,800	-2,30	-2,50	0,20	0,60
688,900	-2,36	-2,50	0,14	0,44
689,000	-2,43	-2,50	0,07	0,08
710,900	-2,40	-2,50	0,10	0,17
711,000	-2,08	-2,50	0,42	2,12
711,100	-1,80	-2,50	0,70	5,78
711,200	-1,68	-2,50	0,82	8,42
711,300	-1,75	-2,50	0,75	8,21
711,400	-1,74	-2,50	0,76	7,44
711,500	-1,90	-2,50	0,60	4,40
711,600	-1,96	-2,50	0,54	3,58
711,700	-2,00	-2,50	0,50	3,18
711,800	-1,95	-2,50	0,55	4,72
711,900	-1,89	-2,50	0,61	5,22

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
712,000	-1,78	-2,50	0,72	8,21
712,100	-1,69	-2,50	0,81	10,51
712,200	-1,68	-2,50	0,82	10,56
712,300	-1,68	-2,50	0,82	10,74
712,400	-1,66	-2,50	0,84	11,27
712,500	-1,60	-2,50	0,90	12,22
712,600	-1,69	-2,50	0,81	9,47
712,700	-1,84	-2,50	0,66	7,27
712,800	-1,96	-2,50	0,54	5,83
712,900	-2,08	-2,50	0,42	4,89
713,000	-2,12	-2,50	0,38	5,12
713,100	-2,29	-2,50	0,21	2,39
713,200	-2,44	-2,50	0,06	0,05
720,300	-2,46	-2,50	0,04	0,05
727,100	-2,38	-2,50	0,12	0,17
727,200	-2,21	-2,50	0,29	0,84
727,300	-1,92	-2,50	0,58	4,55
727,400	-1,63	-2,50	0,87	8,89
727,500	-1,37	-2,50	1,13	16,61
727,600	-1,25	-2,50	1,25	15,72
727,700	-1,31	-2,50	1,19	16,75
727,800	-1,41	-2,50	1,09	13,91
727,900	-1,53	-2,50	0,97	10,50
728,000	-1,77	-2,50	0,73	6,16
728,100	-1,87	-2,50	0,63	5,25
728,200	-1,97	-2,50	0,53	4,30
728,300	-1,97	-2,50	0,53	3,80
728,400	-2,13	-2,50	0,37	1,93
728,500	-2,25	-2,50	0,25	0,87
728,600	-2,43	-2,50	0,07	0,11
728,900	-2,47	-2,50	0,03	0,02
729,000	-2,46	-2,50	0,04	0,02
736,700	-2,31	-2,50	0,19	0,53
736,800	-2,28	-2,50	0,22	0,91
736,900	-2,27	-2,50	0,23	0,93
737,000	-2,33	-2,50	0,17	0,51
737,200	-2,43	-2,50	0,07	0,15
742,100	-2,37	-2,50	0,13	0,46
742,200	-2,25	-2,50	0,25	1,28
742,300	-2,32	-2,50	0,18	1,01
742,400	-2,19	-2,50	0,31	3,24
742,500	-2,40	-2,50	0,10	1,53
766,200	-2,43	-2,50	0,07	0,12
779,400	-2,45	-2,50	0,05	0,11

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m²]
825,300	-2,47	-2,50	0,03	0,02
832,900	-2,36	-2,50	0,14	0,22
851,300	-2,23	-2,50	0,27	0,42

Anlage 5

Tabellenwerte zu Bild 16

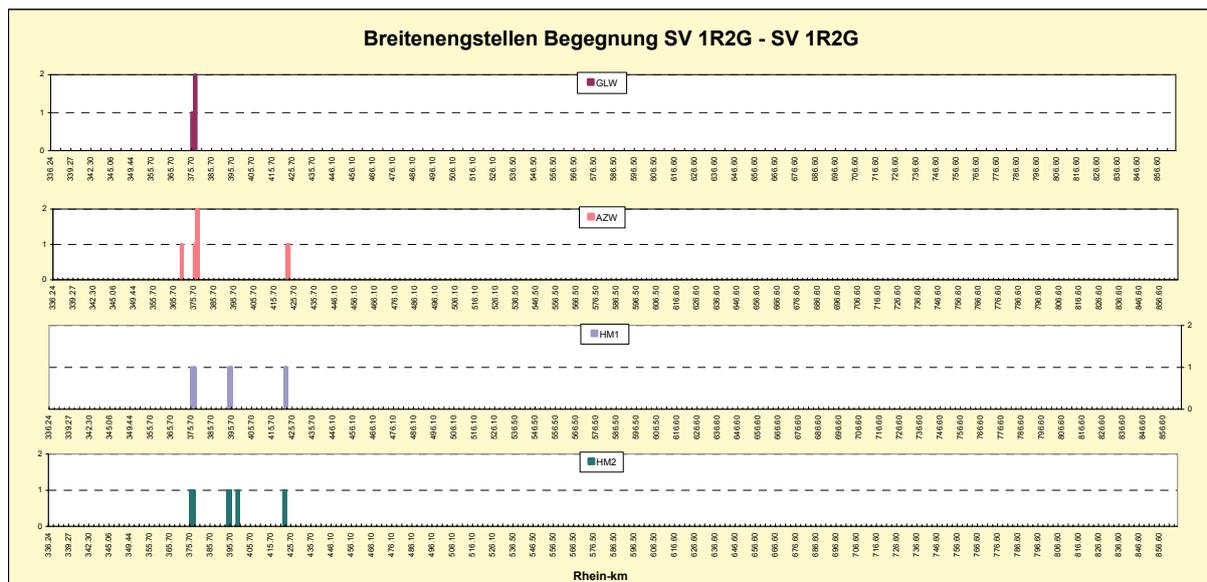


Bild 16: *Ermittelte Breitenengstellen für die Begegnung zweier 185 m langer und 11,45 m breiter Schubverbände*

Tabellenwerte zu Bild 16

Abfluss	von km	bis km	Begegnung in Fahrrinne	Begegnung im Fahrwasser
GLW				
	375,800	376,500	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
	377,100	377,900	Begegnung nicht möglich	Begegnung nicht möglich
AZW				
	369,300	370,000	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
	375,800	376,500	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
	377,100	377,900	Begegnung nicht möglich	Begegnung nicht möglich
	422,000	423,200	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
HWM1				
	375,800	376,500	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
	377,100	377,900	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
	394,200	396,000	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
	422,000	423,200	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
HWM2				
	375,800	376,500	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
	377,100	377,900	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
	394,200	396,000	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
	399,000	400,000	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
	422,000	423,200	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich

Anlage 6

Tabellenwerte zu Bild 17

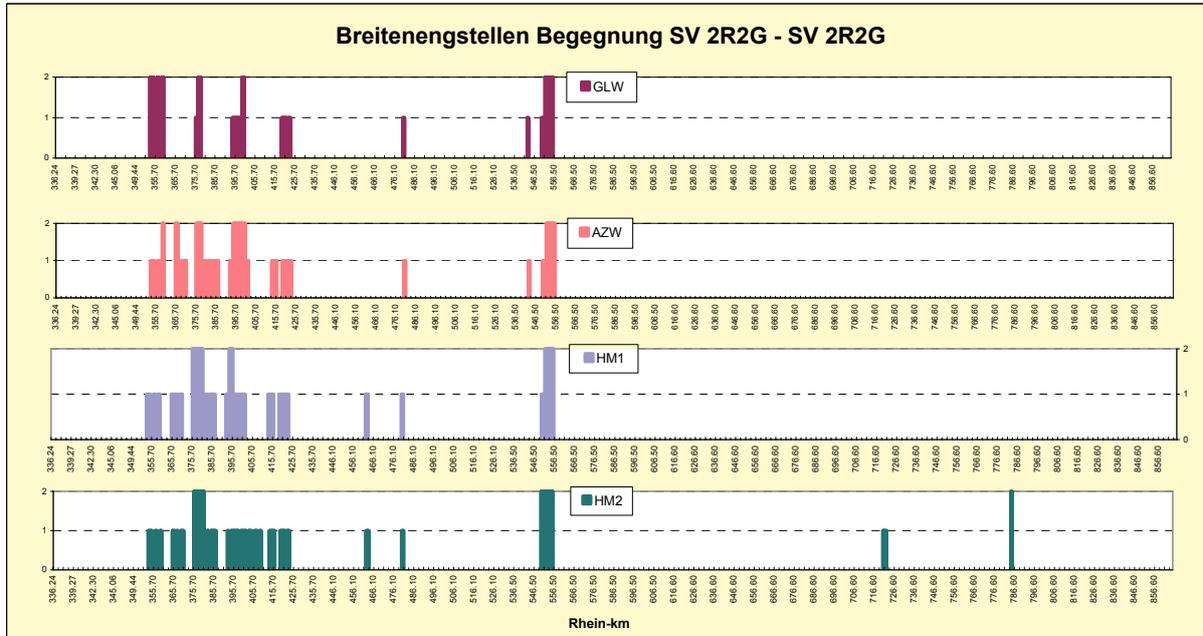


Bild 17: *Ermittelte Breitenengstellen für die Begegnung zweier 185 m langer und 22,90 m breiter Schubverbände*

Tabellenwerte zu Bild 17

Abfluss	von km	bis km	Begegnung in Fahrrinne	Begegnung im Fahrwasser
GLW				
	353,000	354,900	Begegnung nicht möglich	Begegnung nicht möglich
	356,500	357,400	Begegnung nicht möglich	Begegnung nicht möglich
	358,800	359,800	Begegnung nicht möglich	Begegnung nicht möglich
	375,800	376,900	Begegnung nicht möglich	Begegn. eingeschränkt mögl.
	377,100	378,500	Begegnung nicht möglich	Begegnung nicht möglich
	394,200	398,600	Begegnung nicht möglich	eingeschränkte Sicherheit
	399,100	400,400	Begegnung nicht möglich	Begegnung nicht möglich
	418,900	421,600	eingeschränkte Sicherheit	eingeschränkte Leichtigkeit
	422,100	423,600	Begegnung nicht möglich	eingeschränkte Leichtigkeit
	480,000	481,000	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
	542,800	543,500	eingeschränkte Sicherheit	eingeschränkte Sicherheit
	550,000	551,400	eingeschränkte Sicherheit	eingeschränkte Sicherheit
	551,800	553,000	Begegnung nicht möglich	Begegnung nicht möglich
	553,000	556,000	Begegnung nicht möglich	Begegnung nicht möglich
AZW				
	353,000	354,900	Begegnung nicht möglich	eingeschränkte Leichtigkeit
	356,500	357,400	Begegnung nicht möglich	eingeschränkte Leichtigkeit
	358,800	359,800	Begegnung nicht möglich	Begegnung nicht möglich
	365,300	366,500	Begegnung nicht möglich	Begegnung nicht möglich
	367,200	368,100	Begegnung nicht möglich	eingeschränkte Leichtigkeit
	369,300	370,800	Begegnung nicht möglich	eingeschränkte Leichtigkeit
	375,800	376,900	Begegnung nicht möglich	Begegnung nicht möglich
	377,100	378,500	Begegnung nicht möglich	Begegnung nicht möglich
	379,200	380,900	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
	382,400	383,400	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
	384,100	387,000	Begegnung nicht möglich	eingeschränkte Leichtigkeit
	392,600	393,500	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
	394,200	398,600	Begegnung nicht möglich	Begegnung nicht möglich
	399,100	400,400	Begegnung nicht möglich	Begegnung nicht möglich
	400,400	402,000	Begegnung nicht möglich	eingeschränkte Leichtigkeit
	413,500	416,200	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
	418,900	421,600	eingeschränkte Sicherheit	eingeschränkte Leichtigkeit
	422,100	423,600	Begegnung nicht möglich	eingeschränkte Leichtigkeit
	480,000	481,000	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
	542,800	543,500	eingeschränkte Sicherheit	eingeschränkte Sicherheit

Abfluss	von km	bis km	Begegnung in Fahrrinne	Begegnung im Fahrwasser
	550,000	551,400	eingeschränkte Sicherheit	eingeschränkte Sicherheit
	551,800	553,000	Begegnung nicht möglich	Begegnung nicht möglich
	553,000	556,000	Begegnung nicht möglich	Begegnung nicht möglich
HWM1				
	353,000	354,900	Begegnung nicht möglich	eingeschränkte Leichtigkeit
	356,500	357,400	Begegnung nicht möglich	eingeschränkte Leichtigkeit
	358,800	359,800	Begegnung nicht möglich	eingeschränkte Leichtigkeit
	365,300	366,500	Begegnung nicht möglich	eingeschränkte Leichtigkeit
	367,200	368,100	Begegnung nicht möglich	eingeschränkte Leichtigkeit
	369,300	370,800	Begegnung nicht möglich	eingeschränkte Leichtigkeit
	375,800	376,900	Begegnung nicht möglich	Begegnung nicht möglich
	377,100	378,500	Begegnung nicht möglich	Begegnung nicht möglich
	379,200	380,900	Begegnung nicht möglich	Begegnung nicht möglich
	382,400	383,400	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
	384,100	387,000	Begegnung nicht möglich	eingeschränkte Leichtigkeit
	392,600	393,200	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
	394,200	395,900	Begegnung nicht möglich	Begegnung nicht möglich
	395,900	398,300	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
	399,100	400,400	Begegnung nicht möglich	eingeschränkte Leichtigkeit
	400,400	402,000	Begegnung nicht möglich	eingeschränkte Leichtigkeit
	413,500	416,200	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
	418,900	421,600	eingeschränkte Sicherheit	eingeschränkte Leichtigkeit
	422,100	423,600	Begegnung nicht möglich	eingeschränkte Leichtigkeit
	462,200	463,600	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
	480,000	481,000	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
	550,000	551,400	eingeschränkte Sicherheit	eingeschränkte Sicherheit
	551,800	553,000	Begegnung nicht möglich	Begegnung nicht möglich
	553,000	556,000	Begegnung nicht möglich	Begegnung nicht möglich
HWM2				
	353,000	354,900	Begegnung nicht möglich	eingeschränkte Leichtigkeit
	356,500	357,400	Begegnung nicht möglich	eingeschränkte Leichtigkeit
	358,800	359,800	Begegnung nicht möglich	eingeschränkte Leichtigkeit
	365,100	366,500	Begegnung nicht möglich	eingeschränkte Leichtigkeit
	367,200	367,900	Begegnung nicht möglich	eingeschränkte Leichtigkeit
	369,300	370,800	Begegnung nicht möglich	eingeschränkte Leichtigkeit
	375,800	376,900	Begegnung nicht möglich	Begegnung nicht möglich
	377,100	378,500	Begegnung nicht möglich	Begegnung nicht möglich
	379,200	380,900	Begegnung nicht möglich	Begegnung nicht möglich

Abfluss	von km	bis km	Begegnung in Fahrrinne	Begegnung im Fahrwasser
	382,400	383,400	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
	384,100	387,000	Begegnung nicht möglich	eingeschränkte Leichtigkeit
	392,600	393,200	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
	394,200	395,900	Begegnung nicht möglich	Begegnung nicht möglich
	395,900	398,300	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
	399,100	400,400	Begegnung nicht möglich	eingeschränkte Leichtigkeit
	400,400	402,000	Begegnung nicht möglich	eingeschränkte Leichtigkeit
	403,000	404,800	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
	406,100	407,600	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
	408,700	409,500	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
	413,500	416,200	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
	418,900	421,600	Begegnung nicht möglich	eingeschränkte Leichtigkeit
	422,100	423,600	Begegnung nicht möglich	eingeschränkte Leichtigkeit
	462,200	463,600	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
	480,000	481,000	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
	550,000	551,400	Begegnung nicht möglich	Begegnung nicht möglich
	551,800	553,000	Begegnung nicht möglich	Begegnung nicht möglich
	553,000	556,000	Begegnung nicht möglich	Begegnung nicht möglich
	720,800	722,700	Begegnung nicht möglich	Begegnung möglich
	784,700	785,400	Begegnung nicht möglich	Begegnung nicht möglich

Anlage 7

Tabellenwerte zu Bild 19 und Bild 20

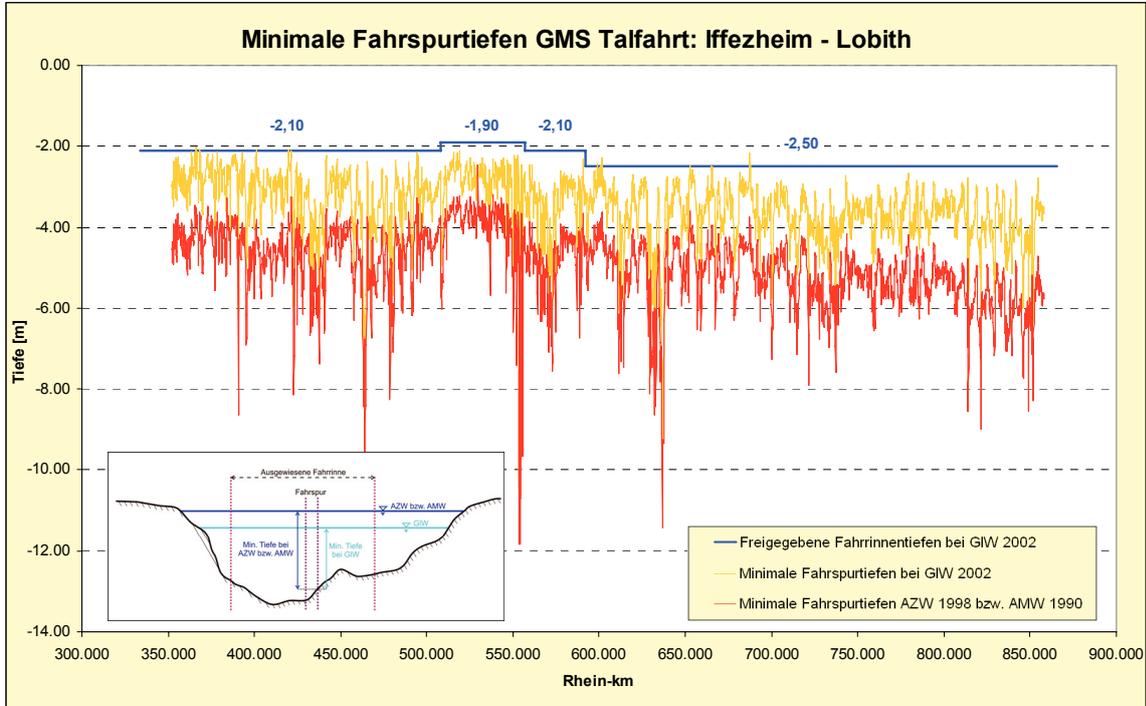


Bild 19: Minimale Fahrspurtiefen für die Talfahrt des GMS

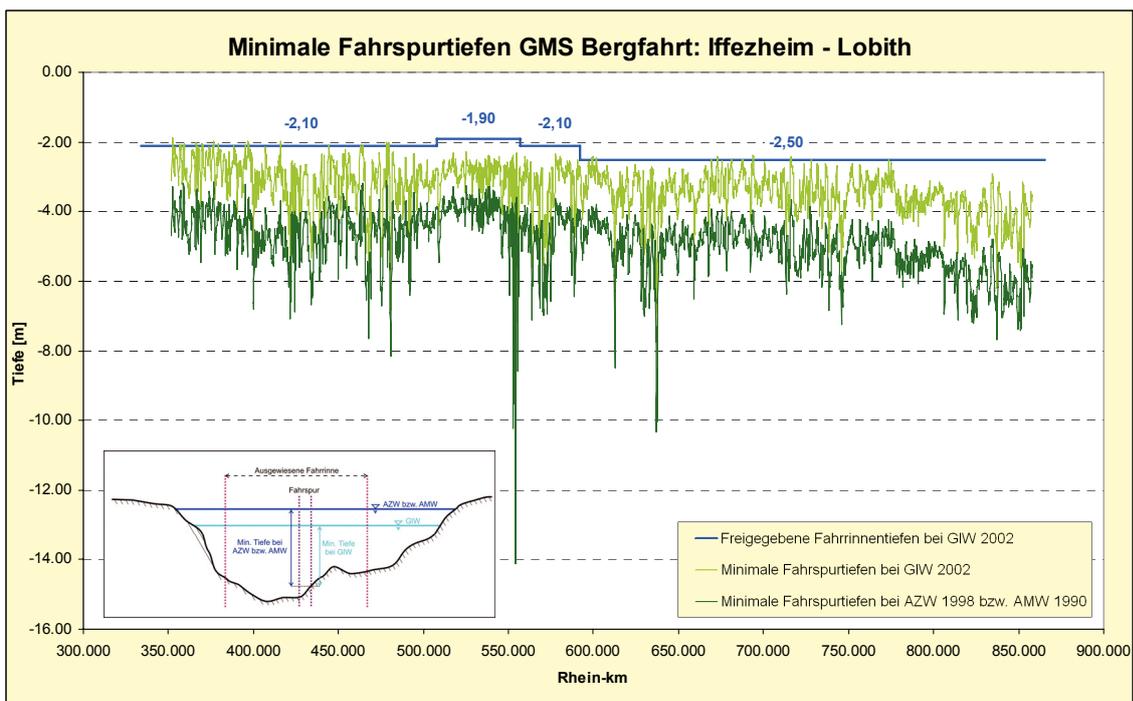


Bild 20: Minimale Fahrspurtiefen für die Bergfahrt des GMS

Tabellenwerte zu Bild19 und Bild 20

Talfahrt bei GLW 2002		
Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
366,300	-2,10	-2,03
366,400	-2,10	-2,09
368,500	-2,10	-2,08
401,100	-2,10	-2,09
419,900	-2,10	-2,08
599,100	-2,50	-2,44
599,200	-2,50	-2,42
601,000	-2,50	-2,47
601,400	-2,50	-2,28
601,900	-2,50	-2,29
652,600	-2,50	-2,50
652,700	-2,50	-2,46
652,800	-2,50	-2,49
665,300	-2,50	-2,48
687,300	-2,50	-2,18
687,400	-2,50	-2,39
687,500	-2,50	-2,46

Bergfahrt bei GLW 2002		
Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
352,300	-2,10	-2,04
352,400	-2,10	-1,87
352,500	-2,10	-1,98
352,600	-2,10	-2,04
356,700	-2,10	-2,08
359,000	-2,10	-2,07
359,200	-2,10	-2,09
359,500	-2,10	-2,05
366,500	-2,10	-2,02
366,600	-2,10	-2,08

Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
370,000	-2,10	-2,04
370,100	-2,10	-2,08
376,300	-2,10	-2,10
376,600	-2,10	-2,07
376,700	-2,10	-1,98
379,200	-2,10	-2,05
396,900	-2,10	-2,08
397,000	-2,10	-1,97
397,100	-2,10	-2,05
397,200	-2,10	-2,04
416,100	-2,10	-1,99
478,200	-2,10	-2,08
478,300	-2,10	-2,06
478,400	-2,10	-2,01
478,500	-2,10	-2,03
479,600	-2,10	-2,00
599,100	-2,50	-2,44
599,200	-2,50	-2,44
599,300	-2,50	-2,50
599,400	-2,50	-2,45
599,500	-2,50	-2,42
601,400	-2,50	-2,46
601,500	-2,50	-2,45
601,700	-2,50	-2,48
672,600	-2,50	-2,47
672,700	-2,50	-2,46
672,800	-2,50	-2,41
672,900	-2,50	-2,47
673,000	-2,50	-2,45
680,800	-2,50	-2,49
693,900	-2,50	-2,37
694,000	-2,50	-2,43
716,000	-2,50	-2,30
716,100	-2,50	-2,30
716,200	-2,50	-2,27
716,300	-2,50	-2,33
716,400	-2,50	-2,40
716,500	-2,50	-2,50

Anlage 8

Tabellenwerte zu Bild 21 und Bild 22

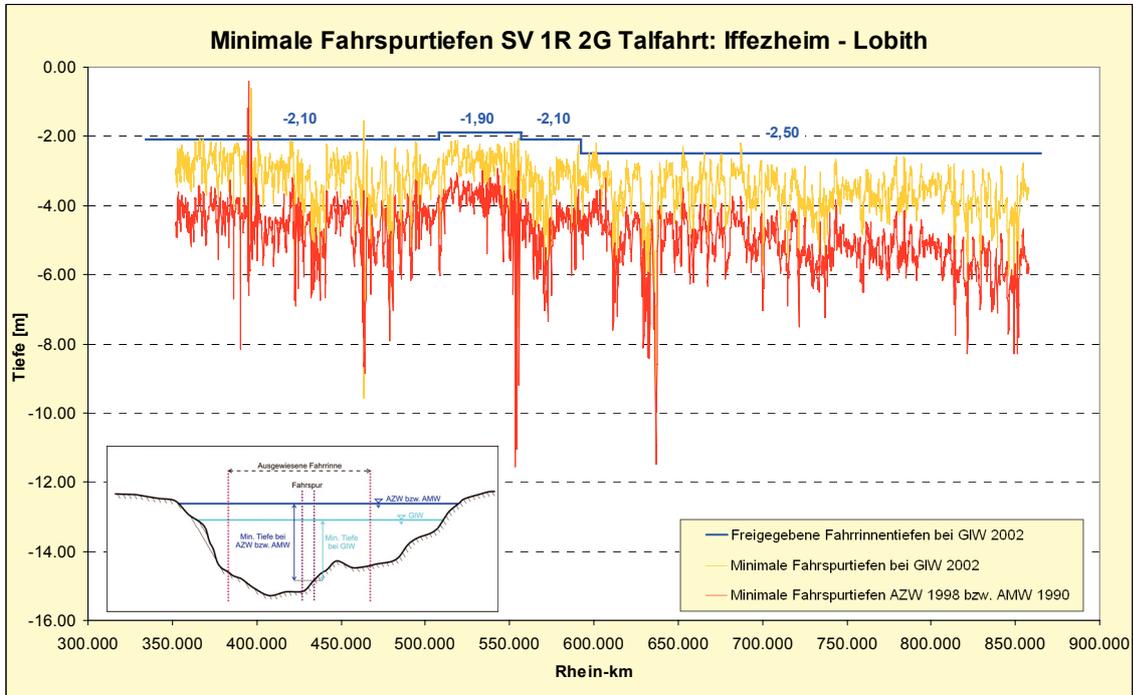


Bild 21: Minimale Fahrspurtiefen für die Talfahrt des SV 1R 2G

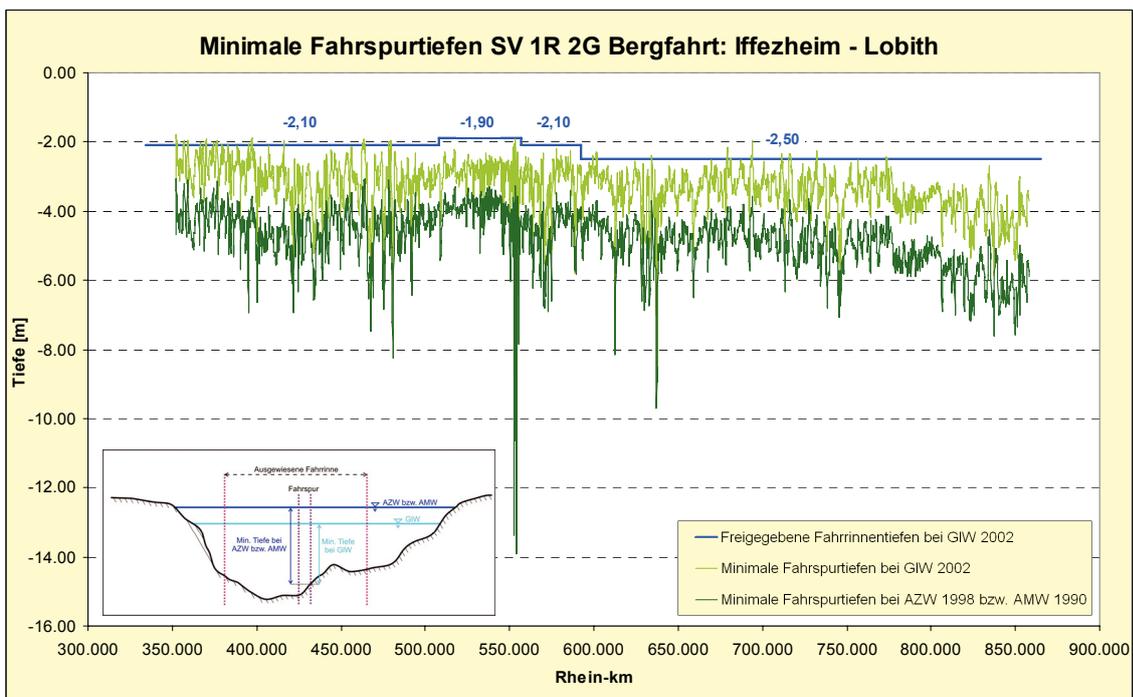


Bild 22: Minimale Fahrspurtiefen für die Bergfahrt des SV 1R 2G

Tabellenwerte zu Bild 21 und Bild 22

Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
366,300	-2,10	-2,03
366,400	-2,10	-2,09
368,500	-2,10	-2,08
396,700	-2,10	-0,62
463,300	-2,10	-1,54
597,300	-2,50	-2,49
599,100	-2,50	-2,47
601,000	-2,50	-2,47
601,400	-2,50	-2,19
652,600	-2,50	-2,50
652,700	-2,50	-2,30
652,800	-2,50	-2,47
665,300	-2,50	-2,48
687,300	-2,50	-2,18
687,400	-2,50	-2,39
687,500	-2,50	-2,39
687,600	-2,50	-2,42

Talfahrt bei AZW 1998 bzw. AMW90		
Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
394,700	-2,10	-1,16
395,300	-2,10	-0,40
396,700	-2,10	-2,04

Bergfahrt bei GLW 2002		
Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
352,300	-2,10	-1,98
352,400	-2,10	-1,79
352,500	-2,10	-1,87
352,600	-2,10	-1,98
356,700	-2,10	-2,08
356,800	-2,10	-2,01
357,000	-2,10	-2,10
357,100	-2,10	-2,07
357,200	-2,10	-1,95
357,300	-2,10	-1,95
359,000	-2,10	-1,95
359,100	-2,10	-2,04
359,200	-2,10	-2,08
359,300	-2,10	-2,00
359,400	-2,10	-2,09
359,500	-2,10	-2,02
366,500	-2,10	-2,02
366,600	-2,10	-2,05
369,700	-2,10	-2,02
369,800	-2,10	-2,09
369,900	-2,10	-1,99
370,000	-2,10	-1,92
370,100	-2,10	-2,08
374,200	-2,10	-2,02
376,300	-2,10	-1,95
376,400	-2,10	-1,96
376,500	-2,10	-1,96
376,600	-2,10	-2,07
376,700	-2,10	-1,98
376,800	-2,10	-2,10
379,200	-2,10	-2,09
383,100	-2,10	-2,05
395,100	-2,10	-2,06
396,900	-2,10	-2,08
397,000	-2,10	-1,97
397,100	-2,10	-1,88
397,200	-2,10	-1,89
397,300	-2,10	-1,97

Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
416,100	-2,10	-1,97
462,600	-2,10	-2,09
462,700	-2,10	-2,04
462,800	-2,10	-2,08
463,000	-2,10	-2,06
463,400	-2,10	-2,04
463,500	-2,10	-2,01
463,900	-2,10	-1,92
478,200	-2,10	-2,03
478,300	-2,10	-2,00
478,400	-2,10	-1,97
479,600	-2,10	-1,95
599,100	-2,50	-2,44
599,200	-2,50	-2,44
599,300	-2,50	-2,45
599,400	-2,50	-2,45
599,500	-2,50	-2,39
601,400	-2,50	-2,35
601,500	-2,50	-2,31
601,600	-2,50	-2,49
601,700	-2,50	-2,30
602,000	-2,50	-2,32
602,200	-2,50	-2,43
634,400	-2,50	-2,38
679,100	-2,50	-2,14
679,200	-2,50	-2,21
679,300	-2,50	-2,29
679,400	-2,50	-2,46
680,800	-2,50	-2,49
680,900	-2,50	-2,49
681,100	-2,50	-2,50
693,200	-2,50	-2,39
693,300	-2,50	-2,49
693,800	-2,50	-2,38
693,900	-2,50	-1,95
694,000	-2,50	-2,18
694,100	-2,50	-2,31
694,200	-2,50	-2,40
711,200	-2,50	-2,35
711,300	-2,50	-2,32

Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
715,900	-2,50	-2,19
716,000	-2,50	-2,09
716,100	-2,50	-1,99
716,200	-2,50	-2,00
716,300	-2,50	-2,17
716,400	-2,50	-2,18
716,500	-2,50	-2,27
716,600	-2,50	-2,49
732,200	-2,50	-2,39
732,300	-2,50	-2,33
732,400	-2,50	-2,27
773,600	-2,50	-2,44
773,700	-2,50	-2,48

Anlage 9

Tabellenwerte zu Bild 23 und Bild 24

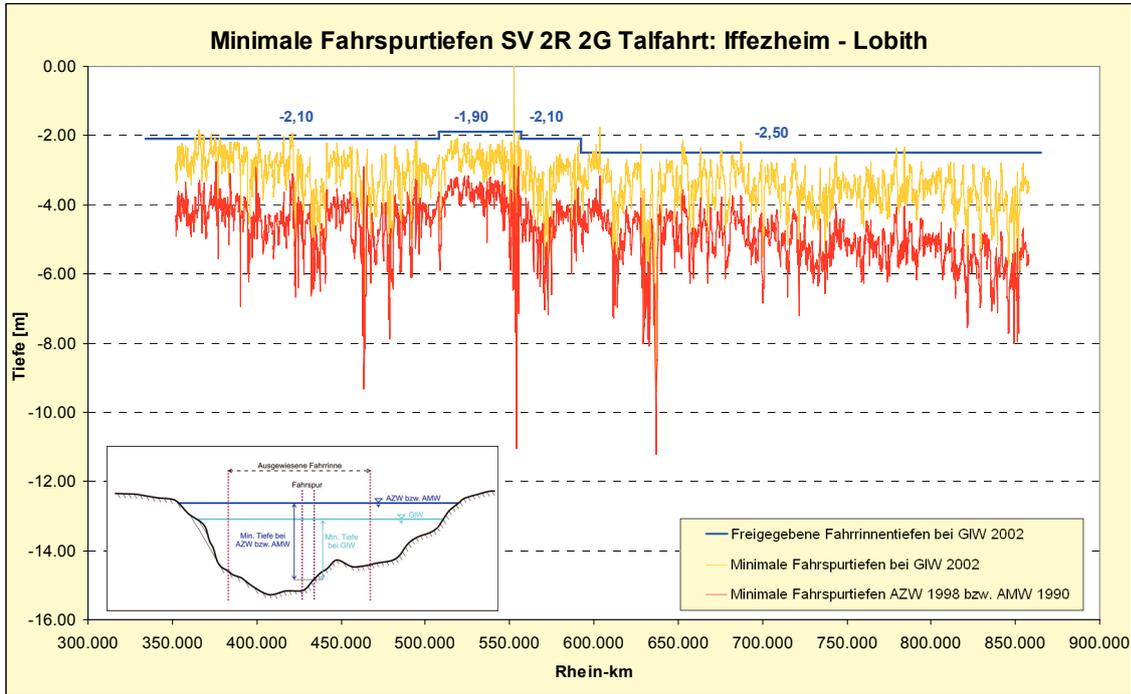


Bild 23: Minimale Fahrspurtiefen für die Talfahrt des SV 2R 2G

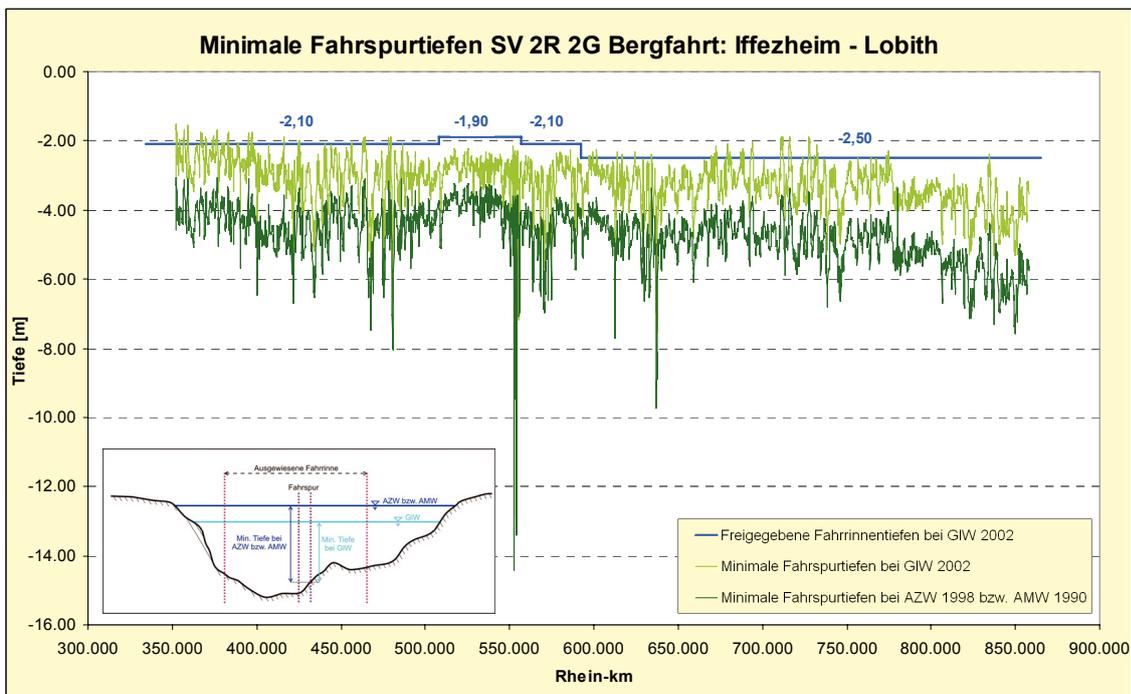


Bild 24: Minimale Fahrspurtiefen für die Bergfahrt des SV 2R 2G

Tabellenwerte zu Bild 23 und Bild 24

Talfahrt bei GLW 2002		
Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
363,400	-2,10	-2,05
363,500	-2,10	-2,09
365,500	-2,10	-2,04
365,600	-2,10	-1,85
365,700	-2,10	-1,94
365,900	-2,10	-2,08
366,000	-2,10	-2,09
366,100	-2,10	-2,03
366,200	-2,10	-2,00
366,300	-2,10	-1,84
366,400	-2,10	-2,09
366,700	-2,10	-2,01
366,800	-2,10	-1,99
368,500	-2,10	-2,05
368,800	-2,10	-1,98
373,000	-2,10	-1,94
373,100	-2,10	-2,01
375,200	-2,10	-2,04
377,900	-2,10	-2,08
378,000	-2,10	-2,04
378,100	-2,10	-2,05
401,100	-2,10	-1,98
416,100	-2,10	-2,04
419,700	-2,10	-2,02
419,900	-2,10	-2,08
420,000	-2,10	-2,03
420,100	-2,10	-2,04
420,500	-2,10	-2,08
420,600	-2,10	-2,01
420,900	-2,10	-2,06
421,000	-2,10	-1,97
421,100	-2,10	-2,04
421,400	-2,10	-1,92
552,500	-1,90	0,00
552,900	-1,90	-1,13
599,100	-2,50	-2,47
599,200	-2,50	-2,46
601,000	-2,50	-2,47
601,400	-2,50	-2,25

Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
603,200	-2,50	-2,34
603,300	-2,50	-1,76
603,400	-2,50	-2,13
627,700	-2,50	-2,25
652,400	-2,50	-2,48
652,500	-2,50	-2,30
652,600	-2,50	-2,16
652,700	-2,50	-2,12
652,800	-2,50	-2,13
652,900	-2,50	-2,23
653,000	-2,50	-2,36
653,100	-2,50	-2,49
653,700	-2,50	-2,43
653,800	-2,50	-2,41
653,900	-2,50	-2,35
663,200	-2,50	-2,36
675,500	-2,50	-2,48
675,800	-2,50	-2,42
675,900	-2,50	-2,46
687,200	-2,50	-2,46
687,300	-2,50	-2,18
687,400	-2,50	-2,25
687,500	-2,50	-2,35
687,600	-2,50	-2,42
779,400	-2,50	-2,39
779,500	-2,50	-2,37
784,100	-2,50	-2,41
784,200	-2,50	-2,32

Bergfahrt bei GLW 2002		
Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
354,100	-2,10	-2,08
354,200	-2,10	-2,05
354,300	-2,10	-1,95
354,400	-2,10	-2,09
356,700	-2,10	-1,95
356,800	-2,10	-1,88
356,900	-2,10	-1,82
357,000	-2,10	-1,69
357,100	-2,10	-1,77
357,200	-2,10	-1,80
357,300	-2,10	-1,95
357,400	-2,10	-2,05
358,900	-2,10	-1,97
359,000	-2,10	-1,57
359,100	-2,10	-1,67
359,200	-2,10	-1,87
359,300	-2,10	-1,65
359,400	-2,10	-1,81
359,500	-2,10	-1,91
366,500	-2,10	-2,02
366,600	-2,10	-1,86
366,700	-2,10	-1,80
366,800	-2,10	-1,76
366,900	-2,10	-1,85
367,000	-2,10	-1,93
367,100	-2,10	-1,97
367,200	-2,10	-1,94
367,300	-2,10	-2,02
367,400	-2,10	-1,80
367,500	-2,10	-2,07
369,700	-2,10	-1,90
369,800	-2,10	-1,95
369,900	-2,10	-1,99
370,000	-2,10	-1,94
370,100	-2,10	-1,99
370,200	-2,10	-2,08
374,000	-2,10	-2,07
374,100	-2,10	-2,03
374,200	-2,10	-1,85
374,300	-2,10	-1,84
374,400	-2,10	-1,93
375,900	-2,10	-2,10
376,000	-2,10	-2,08
376,100	-2,10	-1,95

Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
376,300	-2,10	-1,88
376,400	-2,10	-1,69
376,500	-2,10	-1,67
376,600	-2,10	-1,77
376,700	-2,10	-1,98
376,800	-2,10	-1,75
376,900	-2,10	-1,95
379,200	-2,10	-2,05
380,700	-2,10	-2,06
380,800	-2,10	-2,08
383,000	-2,10	-2,01
383,100	-2,10	-1,82
383,200	-2,10	-1,74
383,300	-2,10	-1,84
389,100	-2,10	-2,05
395,100	-2,10	-1,77
395,200	-2,10	-1,94
395,300	-2,10	-1,80
396,600	-2,10	-2,10
397,000	-2,10	-1,94
397,100	-2,10	-1,93
397,200	-2,10	-1,85
397,300	-2,10	-1,76
397,400	-2,10	-1,83
416,000	-2,10	-2,05
416,100	-2,10	-1,87
424,900	-2,10	-2,09
425,200	-2,10	-2,00
440,300	-2,10	-2,05
440,400	-2,10	-2,08
456,300	-2,10	-2,06
462,700	-2,10	-2,04
462,800	-2,10	-2,04
463,000	-2,10	-2,03
463,400	-2,10	-2,06
463,500	-2,10	-1,99
463,900	-2,10	-1,92
464,200	-2,10	-2,03
464,400	-2,10	-2,07
464,500	-2,10	-1,89

Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
478,200	-2,10	-2,02
478,300	-2,10	-1,95
478,400	-2,10	-1,93
479,400	-2,10	-1,91
479,500	-2,10	-2,07
479,600	-2,10	-1,88
479,700	-2,10	-2,00
486,700	-2,10	-2,08
597,000	-2,50	-2,44
597,200	-2,50	-2,50
597,300	-2,50	-2,49
597,900	-2,50	-2,43
599,100	-2,50	-2,44
599,200	-2,50	-2,44
599,300	-2,50	-2,45
599,400	-2,50	-2,45
599,500	-2,50	-2,31
601,400	-2,50	-2,41
601,500	-2,50	-2,45
601,600	-2,50	-2,42
601,700	-2,50	-2,25
613,700	-2,50	-2,36
613,800	-2,50	-2,33
614,000	-2,50	-2,41
616,800	-2,50	-2,40
624,400	-2,50	-2,37
624,500	-2,50	-2,34
634,300	-2,50	-2,38
634,400	-2,50	-2,45
669,500	-2,50	-2,42
669,600	-2,50	-2,42
670,300	-2,50	-2,46
671,500	-2,50	-2,35
672,300	-2,50	-2,50
672,400	-2,50	-2,29
672,500	-2,50	-2,15
672,600	-2,50	-2,25

Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
672,700	-2,50	-2,25
672,800	-2,50	-2,36
672,900	-2,50	-2,37
673,000	-2,50	-2,46
679,100	-2,50	-2,08
679,400	-2,50	-2,37
679,500	-2,50	-2,32
679,600	-2,50	-2,26
680,000	-2,50	-2,44
680,800	-2,50	-2,34
680,900	-2,50	-2,35
681,000	-2,50	-2,47
681,100	-2,50	-2,45
687,300	-2,50	-2,33
688,400	-2,50	-2,29
688,700	-2,50	-2,23
688,800	-2,50	-2,37
693,100	-2,50	-2,48
693,200	-2,50	-2,48
693,300	-2,50	-2,25
693,400	-2,50	-2,22
693,500	-2,50	-2,39
693,600	-2,50	-2,31
693,700	-2,50	-2,29
693,800	-2,50	-2,16
693,900	-2,50	-2,03
694,000	-2,50	-2,22
694,100	-2,50	-2,05
694,200	-2,50	-2,14
694,300	-2,50	-2,25
694,400	-2,50	-2,40
710,900	-2,50	-2,30
711,000	-2,50	-1,97
711,100	-2,50	-1,89
711,200	-2,50	-1,90
711,300	-2,50	-1,89
711,400	-2,50	-2,01
711,500	-2,50	-1,99
711,600	-2,50	-2,12
711,700	-2,50	-2,25
711,800	-2,50	-2,08
711,900	-2,50	-2,11
712,000	-2,50	-1,98
712,100	-2,50	-1,89
712,200	-2,50	-2,01

Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
712,300	-2,50	-2,18
712,400	-2,50	-2,38
715,800	-2,50	-2,18
715,900	-2,50	-1,95
716,000	-2,50	-1,99
716,100	-2,50	-1,90
716,200	-2,50	-1,94
716,300	-2,50	-2,01
716,400	-2,50	-2,07
716,500	-2,50	-2,13
716,600	-2,50	-2,37
716,700	-2,50	-2,48
724,000	-2,50	-2,50
727,100	-2,50	-2,48
727,200	-2,50	-2,42
727,300	-2,50	-2,05
727,400	-2,50	-1,98
727,500	-2,50	-2,03
727,600	-2,50	-1,92
727,700	-2,50	-1,90
727,800	-2,50	-1,97
727,900	-2,50	-1,96
728,000	-2,50	-2,06
728,100	-2,50	-2,03
728,200	-2,50	-2,07
728,300	-2,50	-2,14
728,400	-2,50	-2,33
730,900	-2,50	-2,44
732,100	-2,50	-2,27
732,200	-2,50	-2,26
732,300	-2,50	-2,24
732,400	-2,50	-2,13
732,500	-2,50	-2,50
732,600	-2,50	-2,35
756,700	-2,50	-2,50
764,300	-2,50	-2,47
773,600	-2,50	-2,42
773,700	-2,50	-2,42
774,800	-2,50	-2,36
774,900	-2,50	-2,28

Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
834,800	-2,50	-2,38
834,900	-2,50	-2,43

Anlage 10

Tabellenwerte zu Bild 27 und Bild 28

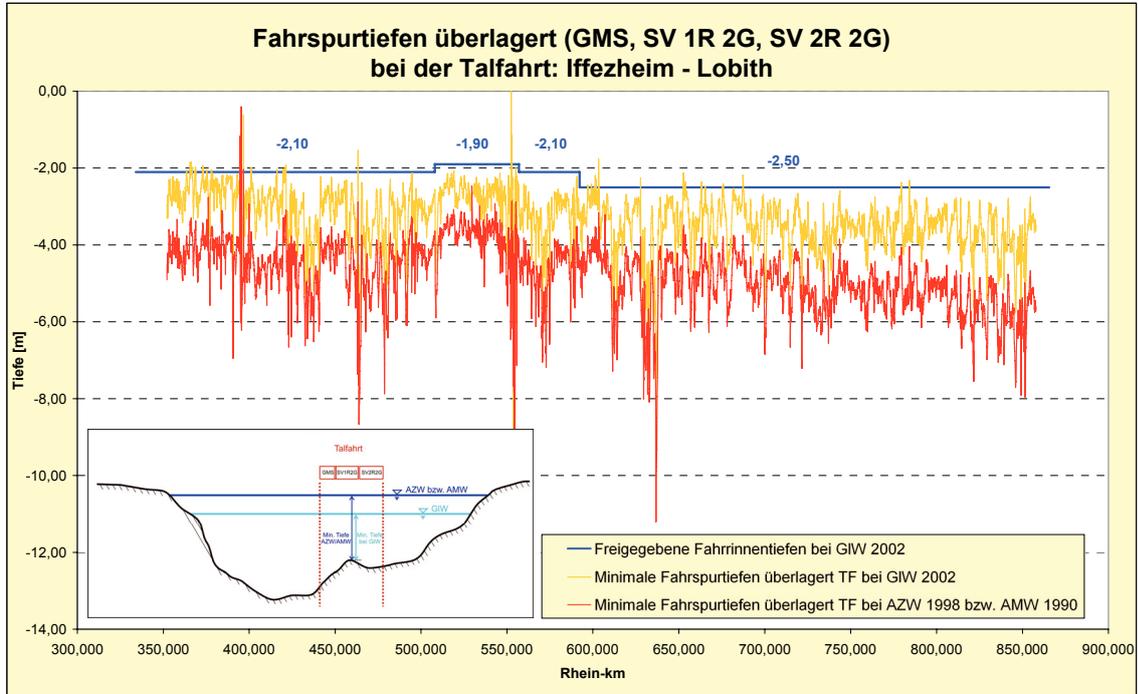


Bild 27: Minimale Fahrspurtiefen überlagert für die Talfahrt

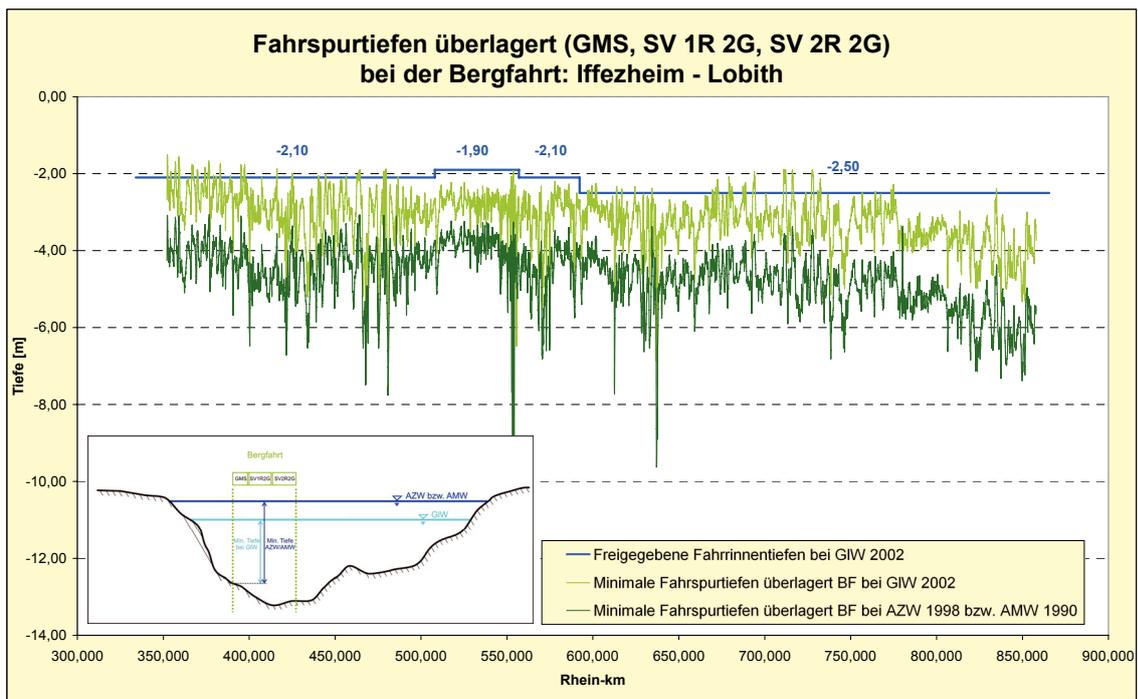


Bild 28: Minimale Fahrspurtiefen überlagert für die Bergfahrt

Tabellenwerte zu Bild 27 und Bild 28

Talfahrt bei GLW 2002		
Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
363,400	-2,10	-2,05
363,500	-2,10	-2,09
365,500	-2,10	-2,04
365,600	-2,10	-1,85
365,700	-2,10	-1,94
365,900	-2,10	-2,08
366,000	-2,10	-2,09
366,100	-2,10	-2,03
366,200	-2,10	-2,00
366,300	-2,10	-1,84
366,400	-2,10	-2,09
366,700	-2,10	-2,01
366,800	-2,10	-1,99
368,500	-2,10	-2,05
368,800	-2,10	-1,98
373,000	-2,10	-1,94
373,100	-2,10	-2,01
375,200	-2,10	-2,04
377,900	-2,10	-2,08
378,000	-2,10	-2,04
378,100	-2,10	-2,05
396,700	-2,10	-0,62
401,100	-2,10	-1,98
416,100	-2,10	-2,04
419,700	-2,10	-2,02
419,900	-2,10	-2,08
420,000	-2,10	-2,03
420,100	-2,10	-2,04
420,500	-2,10	-2,08
420,600	-2,10	-2,01
420,900	-2,10	-2,06
421,000	-2,10	-1,97
421,100	-2,10	-2,04
421,400	-2,10	-1,92
463,300	-2,10	-1,54
552,900	-1,90	-1,13
597,000	-2,50	-2,44

Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
597,200	-2,50	-2,50
597,300	-2,50	-2,49
599,100	-2,50	-2,44
599,200	-2,50	-2,42
601,000	-2,50	-2,47
601,400	-2,50	-2,19
601,900	-2,50	-2,29
603,200	-2,50	-2,34
603,300	-2,50	-1,76
603,400	-2,50	-2,13
627,700	-2,50	-2,25
652,400	-2,50	-2,48
652,500	-2,50	-2,30
652,600	-2,50	-2,16
652,700	-2,50	-2,12
652,800	-2,50	-2,13
652,900	-2,50	-2,23
653,000	-2,50	-2,36
653,100	-2,50	-2,49
653,700	-2,50	-2,43
653,800	-2,50	-2,41
653,900	-2,50	-2,35
663,200	-2,50	-2,36
665,300	-2,50	-2,48
675,500	-2,50	-2,48
675,800	-2,50	-2,42
675,900	-2,50	-2,46
687,200	-2,50	-2,46
687,300	-2,50	-2,18
687,400	-2,50	-2,25
687,500	-2,50	-2,35
687,600	-2,50	-2,42
779,400	-2,50	-2,39
779,500	-2,50	-2,37
784,100	-2,50	-2,41
784,200	-2,50	-2,32

Talfahrt bei AZW 1998 bzw.		
Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
394,370	-2,10	-1,16
395,300	-2,10	-0,40
396,700	-2,10	-2,04

Bergfahrt bei GLW 2002		
Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
352,300	-2,10	-1,51
352,400	-2,10	-1,51
352,500	-2,10	-1,65
352,600	-2,10	-1,82
352,700	-2,10	-2,05
354,100	-2,10	-2,08
354,200	-2,10	-2,05
354,300	-2,10	-1,95
354,400	-2,10	-2,09
356,700	-2,10	-1,95
356,800	-2,10	-1,88
356,900	-2,10	-1,82
357,000	-2,10	-1,69
357,100	-2,10	-1,77
357,200	-2,10	-1,80
357,300	-2,10	-1,95
357,400	-2,10	-2,05
358,900	-2,10	-1,97
359,000	-2,10	-1,57
359,100	-2,10	-1,67
359,200	-2,10	-1,87
359,300	-2,10	-1,65
359,400	-2,10	-1,81
359,500	-2,10	-1,91
366,500	-2,10	-2,02
366,600	-2,10	-1,86
366,700	-2,10	-1,80
366,800	-2,10	-1,76
366,900	-2,10	-1,85
367,000	-2,10	-1,93

Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
367,100	-2,10	-1,97
367,200	-2,10	-1,94
367,300	-2,10	-2,02
367,400	-2,10	-1,80
367,500	-2,10	-2,07
369,700	-2,10	-1,90
369,800	-2,10	-1,95
369,900	-2,10	-1,99
370,000	-2,10	-1,92
370,100	-2,10	-1,99
370,200	-2,10	-2,08
374,000	-2,10	-2,07
374,100	-2,10	-2,03
374,200	-2,10	-1,85
374,300	-2,10	-1,84
374,400	-2,10	-1,93
375,900	-2,10	-2,10
376,000	-2,10	-2,08
376,100	-2,10	-1,95
376,300	-2,10	-1,88
376,400	-2,10	-1,69
376,500	-2,10	-1,67
376,600	-2,10	-1,77
376,700	-2,10	-1,98
376,800	-2,10	-1,75
376,900	-2,10	-1,95
379,200	-2,10	-2,05
380,700	-2,10	-2,06
380,800	-2,10	-2,08
383,000	-2,10	-2,01
383,100	-2,10	-1,82
383,200	-2,10	-1,74
383,300	-2,10	-1,84
389,100	-2,10	-2,05
395,100	-2,10	-1,77
395,200	-2,10	-1,94
395,300	-2,10	-1,80
396,600	-2,10	-2,10
396,900	-2,10	-1,96
397,000	-2,10	-1,94
397,100	-2,10	-1,88
397,200	-2,10	-1,85

Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
397,300	-2,10	-1,76
397,400	-2,10	-1,83
416,000	-2,10	-2,05
416,100	-2,10	-1,87
424,700	-2,10	-2,09
424,900	-2,10	-2,00
425,200	-2,10	-2,00
440,300	-2,10	-2,05
440,400	-2,10	-2,08
444,500	-2,10	-2,06
444,600	-2,10	-2,01
456,300	-2,10	-2,06
462,600	-2,10	-2,09
462,700	-2,10	-2,04
462,800	-2,10	-2,04
463,000	-2,10	-2,03
463,400	-2,10	-2,04
463,500	-2,10	-1,99
463,900	-2,10	-1,92
464,200	-2,10	-2,03
464,400	-2,10	-2,07
464,500	-2,10	-1,89
478,200	-2,10	-2,02
478,300	-2,10	-1,95
478,400	-2,10	-1,93
478,500	-2,10	-2,03
479,400	-2,10	-1,91
479,500	-2,10	-2,07
479,600	-2,10	-1,88
479,700	-2,10	-2,00
486,700	-2,10	-2,08
597,000	-2,50	-2,44
597,200	-2,50	-2,50
597,300	-2,50	-2,49
597,900	-2,50	-2,43
599,100	-2,50	-2,44
599,200	-2,50	-2,44
599,300	-2,50	-2,45

Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
599,400	-2,50	-2,45
599,500	-2,50	-2,31
601,400	-2,50	-2,35
601,500	-2,50	-2,31
601,600	-2,50	-2,42
601,700	-2,50	-2,25
602,000	-2,50	-2,32
602,200	-2,50	-2,43
613,700	-2,50	-2,36
613,800	-2,50	-2,33
614,000	-2,50	-2,41
616,800	-2,50	-2,40
624,400	-2,50	-2,37
624,500	-2,50	-2,34
634,300	-2,50	-2,38
634,400	-2,50	-2,38
669,500	-2,50	-2,42
669,600	-2,50	-2,42
670,300	-2,50	-2,46
671,500	-2,50	-2,35
672,300	-2,50	-2,50
672,400	-2,50	-2,29
672,500	-2,50	-2,15
672,600	-2,50	-2,25
672,700	-2,50	-2,25
672,800	-2,50	-2,36
672,900	-2,50	-2,37
673,000	-2,50	-2,45
679,100	-2,50	-2,08
679,200	-2,50	-2,11
679,300	-2,50	-2,21
679,400	-2,50	-2,37
679,500	-2,50	-2,32
679,600	-2,50	-2,26
680,000	-2,50	-2,44
680,800	-2,50	-2,34
680,900	-2,50	-2,35
681,000	-2,50	-2,47
681,100	-2,50	-2,45

Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
687,300	-2,50	-2,33
688,400	-2,50	-2,29
688,700	-2,50	-2,23
688,800	-2,50	-2,37
693,100	-2,50	-2,48
693,200	-2,50	-2,39
693,300	-2,50	-2,25
693,400	-2,50	-2,22
693,500	-2,50	-2,39
693,600	-2,50	-2,31
693,700	-2,50	-2,29
693,800	-2,50	-2,16
693,900	-2,50	-1,95
694,000	-2,50	-2,18
694,100	-2,50	-2,05
694,200	-2,50	-2,14
694,300	-2,50	-2,25
694,400	-2,50	-2,40
710,900	-2,50	-2,30
711,000	-2,50	-1,97
711,100	-2,50	-1,89
711,200	-2,50	-1,90
711,300	-2,50	-1,89
711,400	-2,50	-2,01
711,500	-2,50	-1,99
711,600	-2,50	-2,12
711,700	-2,50	-2,25
711,800	-2,50	-2,08
711,900	-2,50	-2,11
712,000	-2,50	-1,98
712,100	-2,50	-1,89
712,200	-2,50	-2,01
712,300	-2,50	-2,18
712,400	-2,50	-2,38
715,800	-2,50	-2,18
715,900	-2,50	-1,95
716,000	-2,50	-1,99
716,100	-2,50	-1,90
716,200	-2,50	-1,94
716,300	-2,50	-2,01
716,400	-2,50	-2,07
716,500	-2,50	-2,13
716,600	-2,50	-2,37
716,700	-2,50	-2,48
724,000	-2,50	-2,50

Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
727,100	-2,50	-2,48
727,200	-2,50	-2,42
727,300	-2,50	-2,05
727,400	-2,50	-1,98
727,500	-2,50	-2,03
727,600	-2,50	-1,92
727,700	-2,50	-1,90
727,800	-2,50	-1,97
727,900	-2,50	-1,96
728,000	-2,50	-2,06
728,100	-2,50	-2,03
728,200	-2,50	-2,07
728,300	-2,50	-2,14
728,400	-2,50	-2,33
730,900	-2,50	-2,44
732,100	-2,50	-2,27
732,200	-2,50	-2,26
732,300	-2,50	-2,24
732,400	-2,50	-2,13
732,500	-2,50	-2,50
732,600	-2,50	-2,35
756,700	-2,50	-2,50
764,300	-2,50	-2,47
773,600	-2,50	-2,42
773,700	-2,50	-2,42
774,800	-2,50	-2,36
774,900	-2,50	-2,28
834,800	-2,50	-2,38
834,900	-2,50	-2,43
597,000	-2,50	-2,44

Anlage 11

Tabellenwerte zu Bild 29

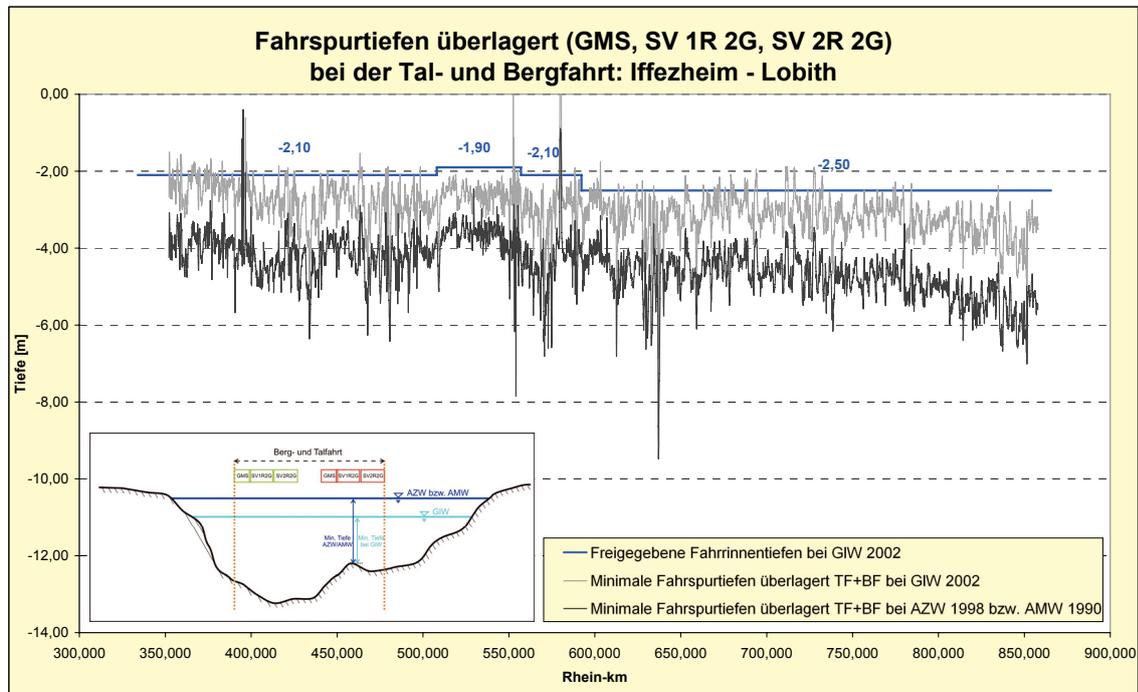


Bild 29: Minimale Fahrsputiefen überlagert für die kombinierte Tal- und Bergfahrt

Tabellenwerte zu Bild 29

kombinierte Tal- und Bergfahrt bei GLW 2002		
Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
352,300	-2,10	-1,51
352,400	-2,10	-1,51
352,500	-2,10	-1,65
352,600	-2,10	-1,82
352,700	-2,10	-2,05
354,100	-2,10	-2,08
354,200	-2,10	-2,05
354,300	-2,10	-1,95
354,400	-2,10	-2,09
356,700	-2,10	-1,95
356,800	-2,10	-1,88
356,900	-2,10	-1,82
357,000	-2,10	-1,69
357,100	-2,10	-1,77
357,200	-2,10	-1,80
357,300	-2,10	-1,95
357,400	-2,10	-2,05
358,900	-2,10	-1,97
359,000	-2,10	-1,57
359,100	-2,10	-1,67
359,200	-2,10	-1,87
359,300	-2,10	-1,65
359,400	-2,10	-1,81
359,500	-2,10	-1,91
363,400	-2,10	-2,05
363,500	-2,10	-2,09
365,500	-2,10	-2,04
365,600	-2,10	-1,85
365,700	-2,10	-1,94
365,900	-2,10	-2,08
366,000	-2,10	-2,09
366,100	-2,10	-2,03
366,200	-2,10	-2,00
366,300	-2,10	-1,84
366,400	-2,10	-2,09
366,500	-2,10	-2,02
366,600	-2,10	-1,86
366,700	-2,10	-1,80
366,800	-2,10	-1,76
366,900	-2,10	-1,85
367,000	-2,10	-1,93
367,100	-2,10	-1,97
367,200	-2,10	-1,94

Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
367,300	-2,10	-2,02
367,400	-2,10	-1,80
367,500	-2,10	-2,07
368,500	-2,10	-2,05
368,800	-2,10	-1,98
369,700	-2,10	-1,90
369,800	-2,10	-1,95
369,900	-2,10	-1,99
370,000	-2,10	-1,92
370,100	-2,10	-1,99
370,200	-2,10	-2,08
373,000	-2,10	-1,94
373,100	-2,10	-2,01
374,000	-2,10	-2,07
374,100	-2,10	-2,03
374,200	-2,10	-1,85
374,300	-2,10	-1,84
374,400	-2,10	-1,93
375,200	-2,10	-2,04
375,900	-2,10	-2,10
376,000	-2,10	-2,08
376,100	-2,10	-1,95
376,300	-2,10	-1,88
376,400	-2,10	-1,69
376,500	-2,10	-1,67
376,600	-2,10	-1,77
376,700	-2,10	-1,98
376,800	-2,10	-1,75
376,900	-2,10	-1,95
377,900	-2,10	-2,08
378,000	-2,10	-2,04
378,100	-2,10	-2,05
379,200	-2,10	-2,05
380,700	-2,10	-2,06
380,800	-2,10	-2,08
383,000	-2,10	-2,01
383,100	-2,10	-1,82
383,200	-2,10	-1,74
383,300	-2,10	-1,84
389,100	-2,10	-2,05

Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
395,100	-2,10	-1,77
395,200	-2,10	-1,94
395,300	-2,10	-1,80
396,600	-2,10	-2,10
396,700	-2,10	-0,62
396,900	-2,10	-1,96
397,000	-2,10	-1,94
397,100	-2,10	-1,88
397,200	-2,10	-1,85
397,300	-2,10	-1,76
397,400	-2,10	-1,83
401,100	-2,10	-1,98
416,000	-2,10	-2,05
416,100	-2,10	-1,87
419,700	-2,10	-2,02
419,900	-2,10	-2,08
420,000	-2,10	-2,03
420,100	-2,10	-2,04
420,500	-2,10	-2,08
420,600	-2,10	-2,01
420,900	-2,10	-2,06
421,000	-2,10	-1,97
421,100	-2,10	-2,04
421,400	-2,10	-1,92
424,700	-2,10	-2,09
424,900	-2,10	-2,00
425,200	-2,10	-2,00
440,300	-2,10	-2,05
440,400	-2,10	-2,08
444,500	-2,10	-2,06
444,600	-2,10	-2,01
456,300	-2,10	-2,06
462,600	-2,10	-2,09
462,700	-2,10	-2,04
462,800	-2,10	-2,04
463,000	-2,10	-2,03
463,300	-2,10	-1,54
463,400	-2,10	-2,04
463,500	-2,10	-1,99
463,900	-2,10	-1,92
464,200	-2,10	-2,03
464,400	-2,10	-2,07

Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
464,500	-2,10	-1,89
478,200	-2,10	-2,02
478,300	-2,10	-1,95
478,400	-2,10	-1,93
478,500	-2,10	-2,03
479,400	-2,10	-1,91
479,500	-2,10	-2,07
479,600	-2,10	-1,88
479,700	-2,10	-2,00
486,700	-2,10	-2,08
498,400	-2,10	-2,01
498,500	-2,10	-1,88
552,900	-1,90	-1,13
579,500	-2,10	-1,75
579,600	-2,10	-0,86
579,700	-2,10	0,00
579,800	-2,10	0,00
579,900	-2,10	0,00
580,000	-2,10	0,00
580,100	-2,10	0,00
580,200	-2,10	0,00
580,300	-2,10	0,00
580,400	-2,10	0,00
580,500	-2,10	-0,47
580,600	-2,10	-1,58
588,500	-2,10	-1,91
597,000	-2,50	-2,44
597,200	-2,50	-2,50
597,300	-2,50	-2,49
597,900	-2,50	-2,43
599,100	-2,50	-2,44
599,200	-2,50	-2,42
599,300	-2,50	-2,45
599,400	-2,50	-2,45
599,500	-2,50	-2,31
601,000	-2,50	-2,47
601,400	-2,50	-2,19
601,500	-2,50	-2,31
601,600	-2,50	-2,42
601,700	-2,50	-2,25

Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
601,900	-2,50	-2,29
602,000	-2,50	-2,32
602,200	-2,50	-2,43
603,200	-2,50	-2,34
603,300	-2,50	-1,76
603,400	-2,50	-2,13
613,700	-2,50	-2,36
613,800	-2,50	-2,33
614,000	-2,50	-2,41
616,800	-2,50	-2,40
624,400	-2,50	-2,37
624,500	-2,50	-2,34
627,700	-2,50	-2,25
634,300	-2,50	-2,38
634,400	-2,50	-2,38
652,400	-2,50	-2,48
652,500	-2,50	-2,30
652,600	-2,50	-2,16
652,700	-2,50	-2,12
652,800	-2,50	-2,13
652,900	-2,50	-2,23
653,000	-2,50	-2,36
653,100	-2,50	-2,49
653,700	-2,50	-2,43
653,800	-2,50	-2,41
653,900	-2,50	-2,35
663,200	-2,50	-2,36
665,300	-2,50	-2,48
669,500	-2,50	-2,42
669,600	-2,50	-2,42
670,300	-2,50	-2,46
671,500	-2,50	-2,35
672,300	-2,50	-2,50
672,400	-2,50	-2,29
672,500	-2,50	-2,15
672,600	-2,50	-2,25

Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
672,700	-2,50	-2,25
672,800	-2,50	-2,36
672,900	-2,50	-2,37
673,000	-2,50	-2,45
675,500	-2,50	-2,48
675,800	-2,50	-2,42
675,900	-2,50	-2,46
679,100	-2,50	-2,08
679,200	-2,50	-2,11
679,300	-2,50	-2,21
679,400	-2,50	-2,37
679,500	-2,50	-2,32
679,600	-2,50	-2,26
680,000	-2,50	-2,44
680,800	-2,50	-2,34
680,900	-2,50	-2,35
681,000	-2,50	-2,47
681,100	-2,50	-2,45
687,100	-2,50	-2,46
687,200	-2,50	-2,36
687,300	-2,50	-2,18
687,400	-2,50	-2,19
687,500	-2,50	-2,35
687,600	-2,50	-2,42
688,400	-2,50	-2,29
688,700	-2,50	-2,23
688,800	-2,50	-2,37
693,100	-2,50	-2,48
693,200	-2,50	-2,39
693,300	-2,50	-2,25
693,400	-2,50	-2,22
693,500	-2,50	-2,39
693,600	-2,50	-2,31
693,700	-2,50	-2,29
693,800	-2,50	-2,16
693,900	-2,50	-1,95
694,000	-2,50	-2,18
694,100	-2,50	-2,05
694,200	-2,50	-2,14
694,300	-2,50	-2,25
694,400	-2,50	-2,40
710,900	-2,50	-2,30
711,000	-2,50	-1,97

Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
711,100	-2,50	-1,89
711,200	-2,50	-1,90
711,300	-2,50	-1,89
711,400	-2,50	-2,01
711,500	-2,50	-1,99
711,600	-2,50	-2,12
711,700	-2,50	-2,25
711,800	-2,50	-2,08
711,900	-2,50	-2,11
712,000	-2,50	-1,98
712,100	-2,50	-1,89
712,200	-2,50	-2,01
712,300	-2,50	-2,18
712,400	-2,50	-2,38
715,800	-2,50	-2,18
715,900	-2,50	-1,95
716,000	-2,50	-1,99
716,100	-2,50	-1,90
716,200	-2,50	-1,94
716,300	-2,50	-2,01
716,400	-2,50	-2,07
716,500	-2,50	-2,13
716,600	-2,50	-2,37
716,700	-2,50	-2,48
724,000	-2,50	-2,50
727,100	-2,50	-2,48
727,200	-2,50	-2,42
727,300	-2,50	-2,05
727,400	-2,50	-1,98
727,500	-2,50	-2,03
727,600	-2,50	-1,92
727,700	-2,50	-1,90
727,800	-2,50	-1,97
727,900	-2,50	-1,96
728,000	-2,50	-2,06
728,100	-2,50	-2,03
728,200	-2,50	-2,07
728,300	-2,50	-2,14
728,400	-2,50	-2,33
730,900	-2,50	-2,44
732,100	-2,50	-2,27
732,200	-2,50	-2,26
732,300	-2,50	-2,24
732,400	-2,50	-2,13
732,500	-2,50	-2,50
732,600	-2,50	-2,35

Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
756,700	-2,50	-2,50
764,300	-2,50	-2,47
773,600	-2,50	-2,42
773,700	-2,50	-2,42
774,800	-2,50	-2,36
774,900	-2,50	-2,28
779,400	-2,50	-2,39
779,500	-2,50	-2,37
784,100	-2,50	-2,41
784,200	-2,50	-2,32
834,800	-2,50	-2,38
834,900	-2,50	-2,43

kombinierte Tal- und Bergfahrt bei AZW 1998 bzw. AMW 1990		
Rhein-km	Fahrrinntiefe [m]	TiefeMin [m]
394,700	-2,10	352,300
		352,300
395,300	-2,10	352,300
		352,300
396,700	-2,10	352,300
		352,300
579,700	-2,10	352,300
579,800	-2,10	352,300
579,900	-2,10	352,300
580,000	-2,10	352,300
580,100	-2,10	352,300
580,200	-2,10	352,300
580,300	-2,10	352,300
580,400	-2,10	352,300
580,500	-2,10	352,300

Anlage 12

Tabellenwerte zu Bild 31 und Bild 32

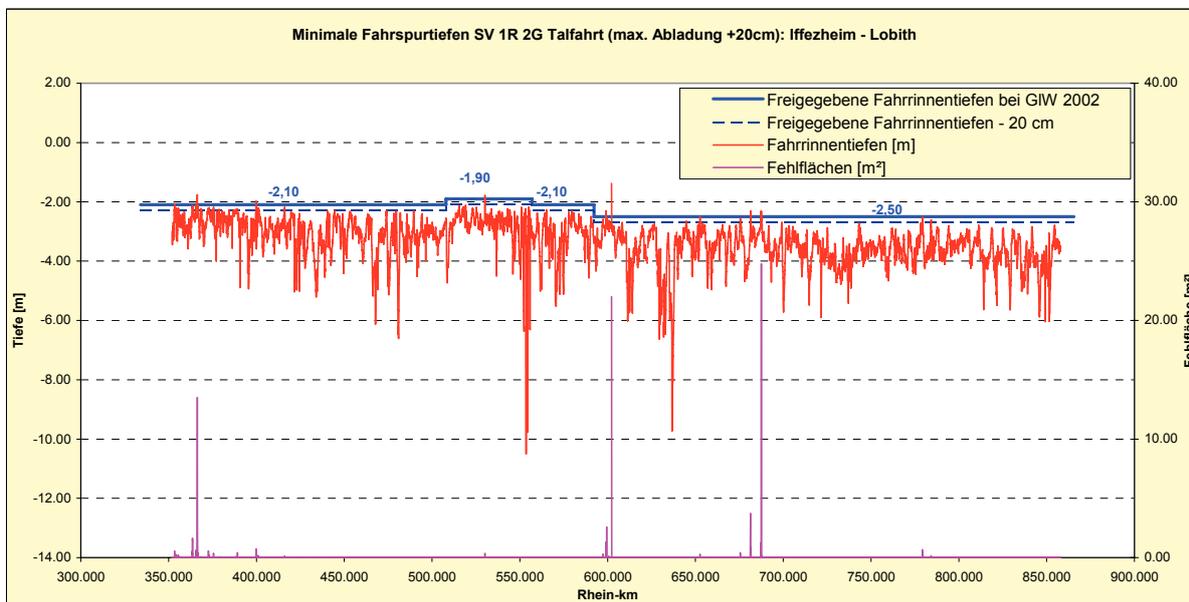


Bild 31: SV 2R 2G-Talfahrt: Fehltiefen und Fehlflächen bei Abladung $T_{max} + 20\text{ cm}$

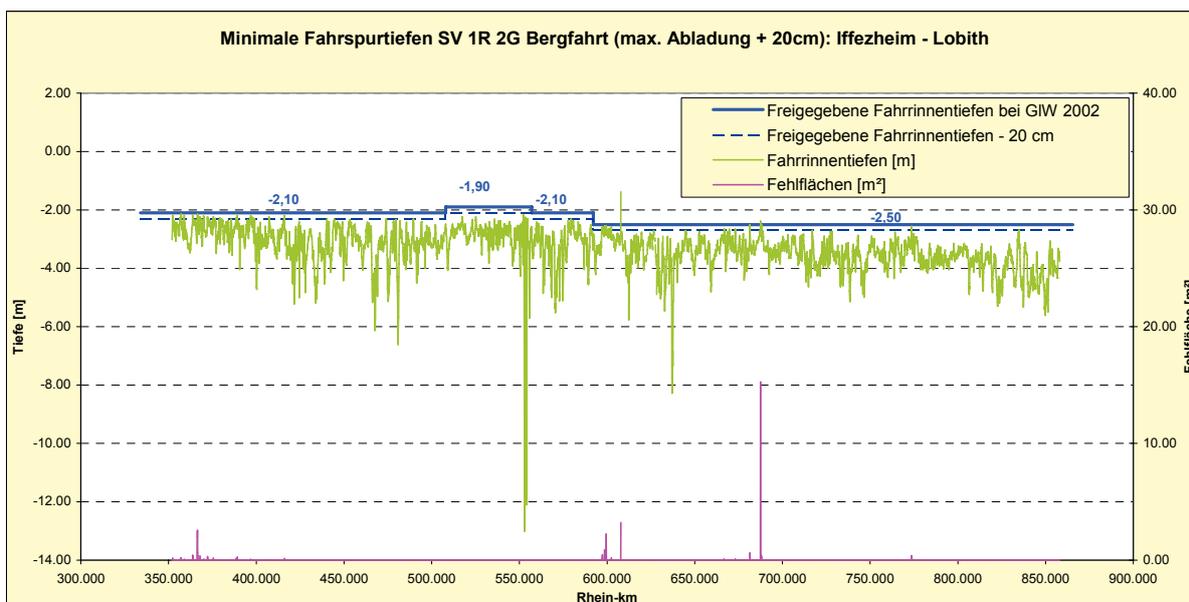


Bild 32: SV 2R 2G-Bergfahrt: Fehltiefen und Fehlflächen bei Abladung $T_{max} + 20\text{ cm}$

Tabellenwerte zu Bild 31 und Bild 32

Talfahrt				
Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe (freigeg. -20 cm) [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m²]
353,200	-2,25	-2,30	-0,05	0,03
353,400	-2,08	-2,30	-0,22	0,54
353,500	-2,26	-2,30	-0,04	0,01
354,100	-2,21	-2,30	-0,09	0,25
355,300	-2,24	-2,30	-0,06	0,03
355,400	-2,22	-2,30	-0,08	0,21
355,600	-2,24	-2,30	-0,06	0,16
363,300	-2,18	-2,30	-0,12	0,51
363,400	-2,17	-2,30	-0,13	0,31
363,500	-2,20	-2,30	-0,10	0,31
363,600	-2,14	-2,30	-0,16	1,61
363,700	-2,19	-2,30	-0,11	1,38
363,800	-2,29	-2,30	-0,01	0,01
363,900	-2,26	-2,30	-0,04	0,12
364,000	-2,29	-2,30	-0,01	0,00
365,400	-2,24	-2,30	-0,06	0,04
365,500	-2,21	-2,30	-0,09	0,40
365,600	-2,13	-2,30	-0,17	0,60
365,700	-2,22	-2,30	-0,08	0,12
366,300	-1,76	-2,30	-0,54	13,49
366,400	-2,10	-2,30	-0,20	2,06
366,500	-2,19	-2,30	-0,11	0,44
366,600	-2,26	-2,30	-0,04	0,16
366,700	-2,15	-2,30	-0,15	0,39
366,800	-2,23	-2,30	-0,07	0,36
366,900	-2,22	-2,30	-0,08	0,11
368,400	-2,25	-2,30	-0,05	0,07
368,500	-2,23	-2,30	-0,07	0,04
368,600	-2,27	-2,30	-0,03	0,03
372,700	-2,21	-2,30	-0,09	0,56
373,000	-2,28	-2,30	-0,02	0,01
373,100	-2,20	-2,30	-0,10	0,20
373,200	-2,21	-2,30	-0,09	0,18
375,600	-2,19	-2,30	-0,11	0,35
378,700	-2,26	-2,30	-0,04	0,06
387,200	-2,28	-2,30	-0,02	0,01
388,200	-2,27	-2,30	-0,03	0,04

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe (freigeig. -20 cm) [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
388,500	-2,27	-2,30	-0,03	0,10
388,700	-2,29	-2,30	-0,01	0,01
389,200	-2,24	-2,30	-0,06	0,40
399,800	-1,98	-2,30	-0,32	0,73
400,900	-2,28	-2,30	-0,02	0,02
401,000	-2,25	-2,30	-0,05	0,16
401,100	-2,22	-2,30	-0,08	0,05
401,200	-2,22	-2,30	-0,08	0,13
401,300	-2,28	-2,30	-0,02	0,04
401,400	-2,28	-2,30	-0,02	0,04
416,100	-2,19	-2,30	-0,11	0,14
530,100	-1,79	-2,10	-0,31	0,34
565,100	-2,27	-2,30	-0,03	0,03
597,200	-2,63	-2,70	-0,07	0,15
597,300	-2,59	-2,70	-0,11	0,28
599,000	-2,31	-2,70	-0,39	1,28
599,100	-2,49	-2,70	-0,21	1,29
599,200	-2,60	-2,70	-0,10	0,05
599,500	-2,54	-2,70	-0,16	2,57
600,500	-2,68	-2,70	-0,02	0,01
600,600	-2,63	-2,70	-0,07	0,12
602,200	-1,38	-2,70	-1,32	22,01
644,900	-2,66	-2,70	-0,04	0,01
652,600	-2,50	-2,70	-0,20	0,26
675,600	-2,57	-2,70	-0,13	0,40
675,800	-2,64	-2,70	-0,06	0,10
675,900	-2,68	-2,70	-0,02	0,02
681,300	-2,31	-2,70	-0,39	3,71
681,400	-2,60	-2,70	-0,10	0,23
681,500	-2,58	-2,70	-0,12	0,84
687,400	-2,67	-2,70	-0,03	0,02
687,500	-2,32	-2,70	-0,38	24,77
687,600	-2,66	-2,70	-0,04	0,11
687,700	-2,55	-2,70	-0,15	0,17
779,200	-2,50	-2,70	-0,20	0,67
779,300	-2,60	-2,70	-0,10	0,22

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe (freigeg. -20 cm) [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
779,400	-2,51	-2,70	-0,19	0,45
779,500	-2,61	-2,70	-0,09	0,14
784,100	-2,61	-2,70	-0,09	0,15
784,200	-2,61	-2,70	-0,09	0,07

Bergfahrt				
Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe (freigeg. -20 cm) [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
352,300	-2,23	-2,30	-0,07	0,04
352,400	-2,19	-2,30	-0,11	0,16
356,600	-2,27	-2,30	-0,03	0,07
356,700	-2,25	-2,30	-0,05	0,02
357,100	-2,14	-2,30	-0,16	0,21
357,200	-2,27	-2,30	-0,03	0,01
357,300	-2,22	-2,30	-0,08	0,02
359,000	-2,19	-2,30	-0,11	0,06
363,700	-2,26	-2,30	-0,04	0,08
363,800	-2,19	-2,30	-0,11	0,40
363,900	-2,25	-2,30	-0,05	0,27
364,000	-2,25	-2,30	-0,05	0,08
366,400	-2,16	-2,30	-0,14	1,97
366,500	-2,15	-2,30	-0,15	2,53
366,600	-2,16	-2,30	-0,14	0,67
366,700	-2,15	-2,30	-0,15	0,35
366,800	-2,25	-2,30	-0,05	0,06
366,900	-2,27	-2,30	-0,03	0,01
368,000	-2,24	-2,30	-0,06	0,34
368,100	-2,28	-2,30	-0,02	0,02
370,000	-2,21	-2,30	-0,09	0,03
370,100	-2,27	-2,30	-0,03	0,01
370,200	-2,23	-2,30	-0,07	0,06
372,200	-2,26	-2,30	-0,04	0,07
372,300	-2,24	-2,30	-0,06	0,29
372,400	-2,27	-2,30	-0,03	0,05
372,600	-2,27	-2,30	-0,03	0,06

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe (freigeg. -20 cm) [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
375,600	-2,23	-2,30	-0,07	0,16
376,600	-2,29	-2,30	-0,01	0,01
379,200	-2,28	-2,30	-0,02	0,01
388,500	-2,27	-2,30	-0,03	0,13
389,200	-2,20	-2,30	-0,10	0,26
396,500	-2,27	-2,30	-0,03	0,02
396,900	-2,19	-2,30	-0,11	0,06
397,000	-2,23	-2,30	-0,07	0,03
397,100	-2,28	-2,30	-0,02	0,02
397,900	-2,28	-2,30	-0,02	0,01
398,000	-2,26	-2,30	-0,04	0,01
407,200	-2,23	-2,30	-0,07	0,04
416,100	-2,20	-2,30	-0,10	0,14
597,000	-2,68	-2,70	-0,02	0,01
597,200	-2,63	-2,70	-0,07	0,15
597,300	-2,57	-2,70	-0,13	0,45
597,700	-2,68	-2,70	-0,02	0,01
598,400	-2,58	-2,70	-0,12	0,07
598,500	-2,63	-2,70	-0,07	0,01
598,600	-2,55	-2,70	-0,15	0,88
599,000	-2,59	-2,70	-0,11	0,60
599,100	-2,60	-2,70	-0,10	0,42
599,200	-2,60	-2,70	-0,10	0,05
599,500	-2,54	-2,70	-0,16	2,22
600,500	-2,68	-2,70	-0,02	0,01
600,600	-2,66	-2,70	-0,04	0,01
601,300	-2,64	-2,70	-0,06	0,01
602,400	-2,58	-2,70	-0,12	0,17
607,900	-1,38	-2,70	-1,32	3,21
666,700	-2,66	-2,70	-0,04	0,08
666,800	-2,67	-2,70	-0,03	0,03
666,900	-2,67	-2,70	-0,03	0,03
669,700	-2,67	-2,70	-0,03	0,04

Rhein-km	TiefeMin [m]	Fahrrinntiefe (freigeg. -20 cm) [m]	Fehltiefe [m]	Fehlfläche [m ²]
673,100	-2,65	-2,70	-0,05	0,08
681,300	-2,63	-2,70	-0,07	0,02
681,400	-2,67	-2,70	-0,03	0,02
681,500	-2,51	-2,70	-0,19	0,62
687,400	-2,67	-2,70	-0,03	0,02
687,500	-2,39	-2,70	-0,31	15,26
687,700	-2,55	-2,70	-0,15	0,17
687,800	-2,59	-2,70	-0,11	0,43
688,000	-2,51	-2,70	-0,19	0,30
773,700	-2,56	-2,70	-0,14	0,38

Anlage 13

abschnittsweise Darstellung zu Bild 34

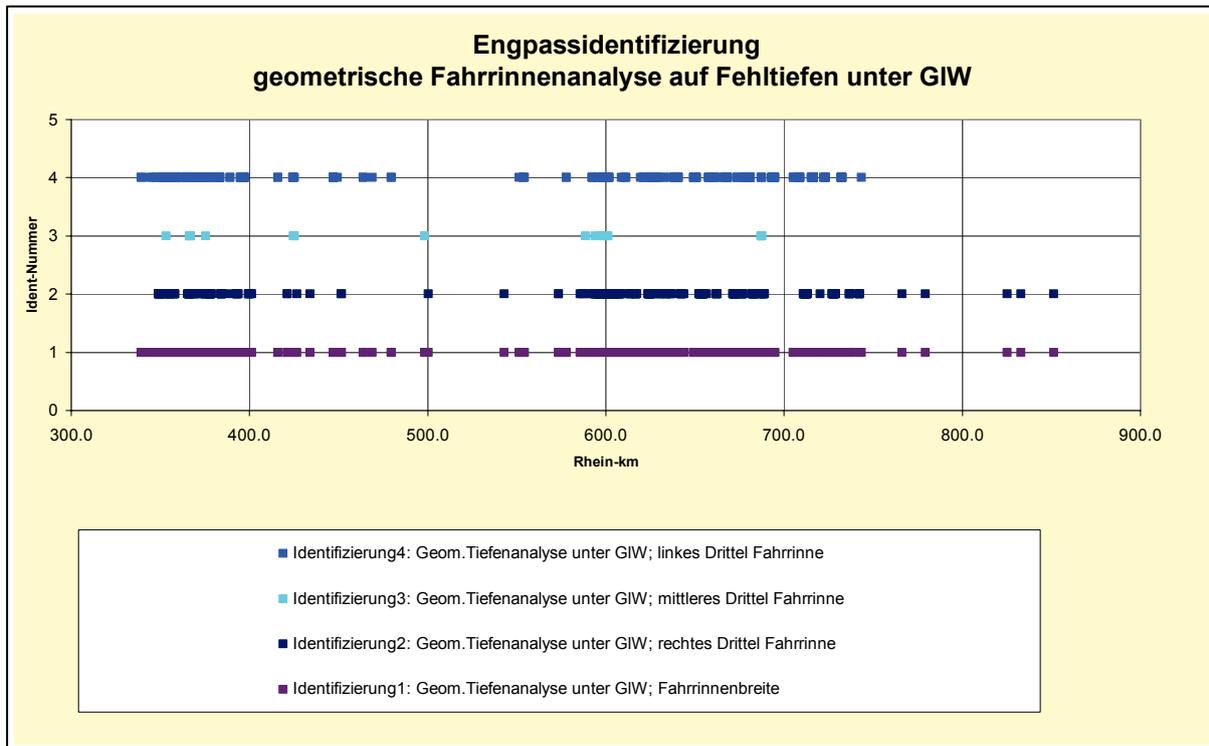
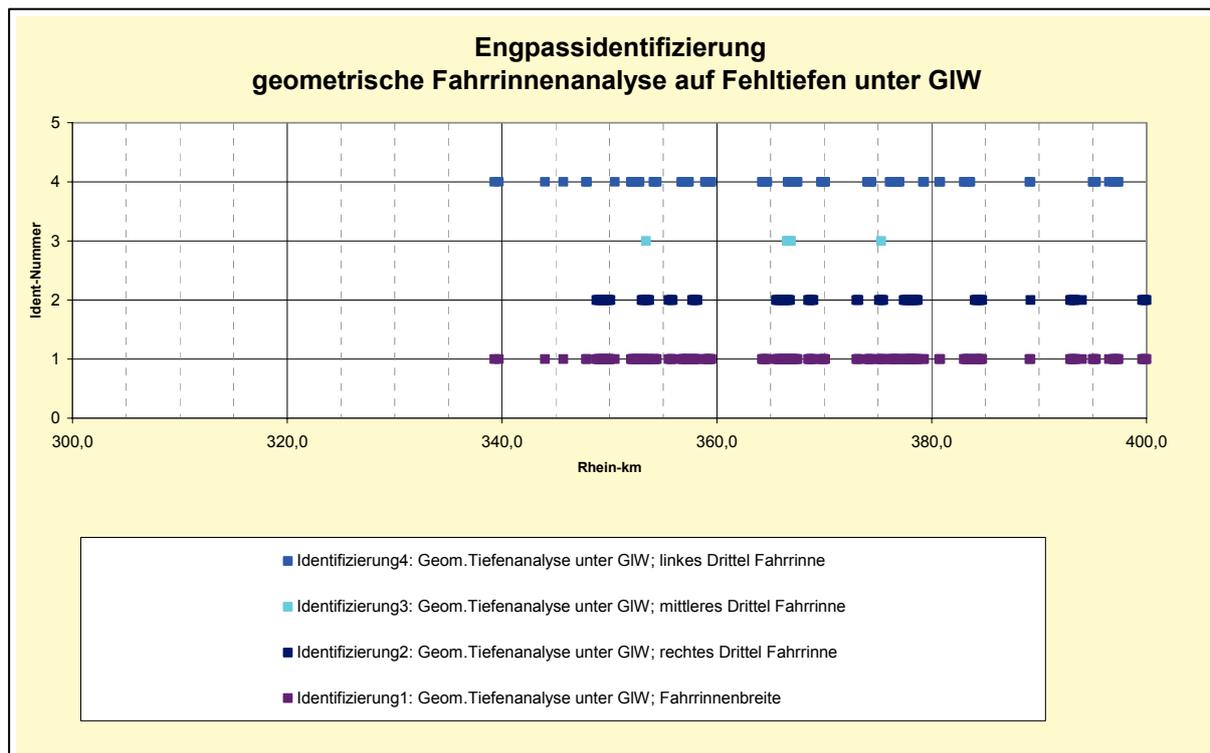
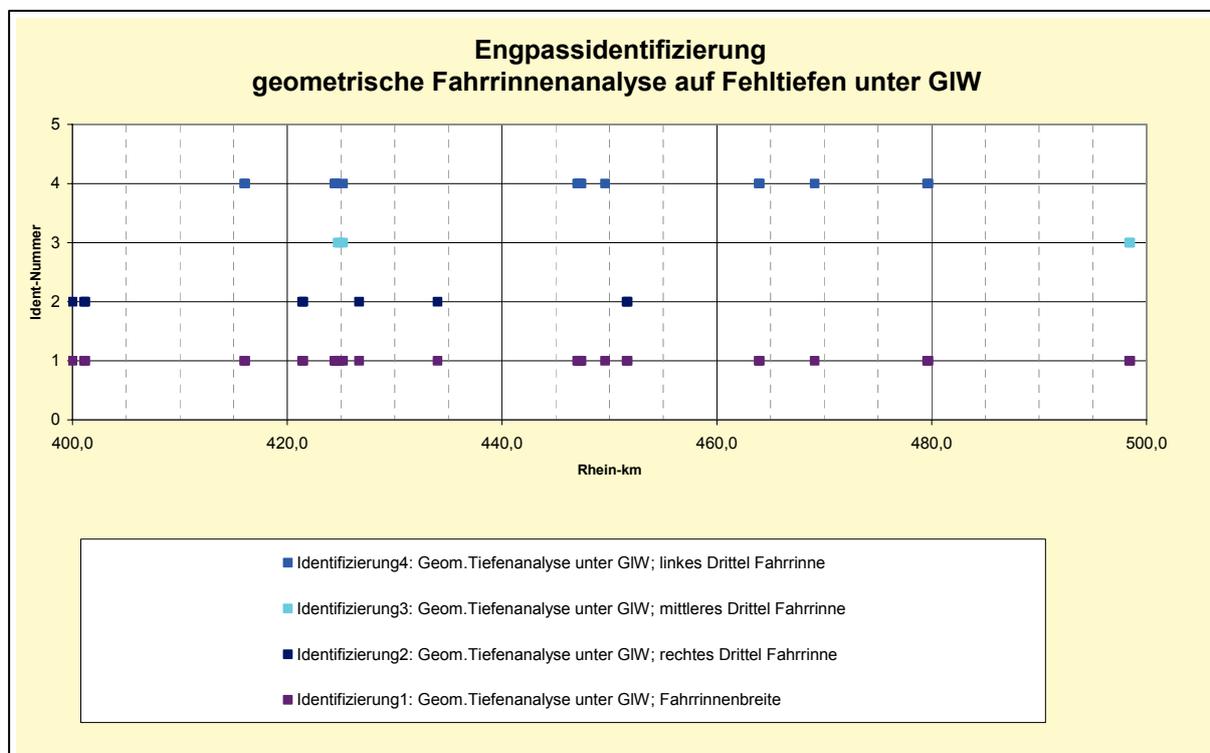


Bild 34: Engpassidentifizierung; geometrische Fahrrinnenanalyse

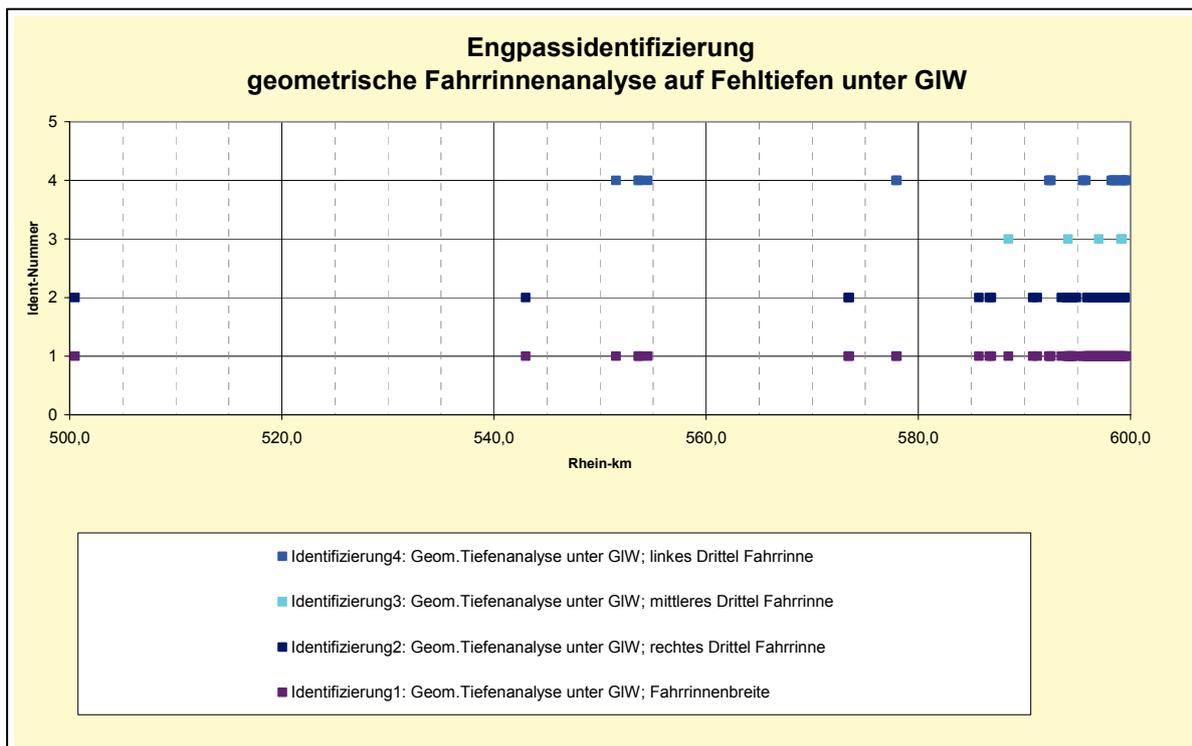
abschnittsweise Darstellung zu Bild 34



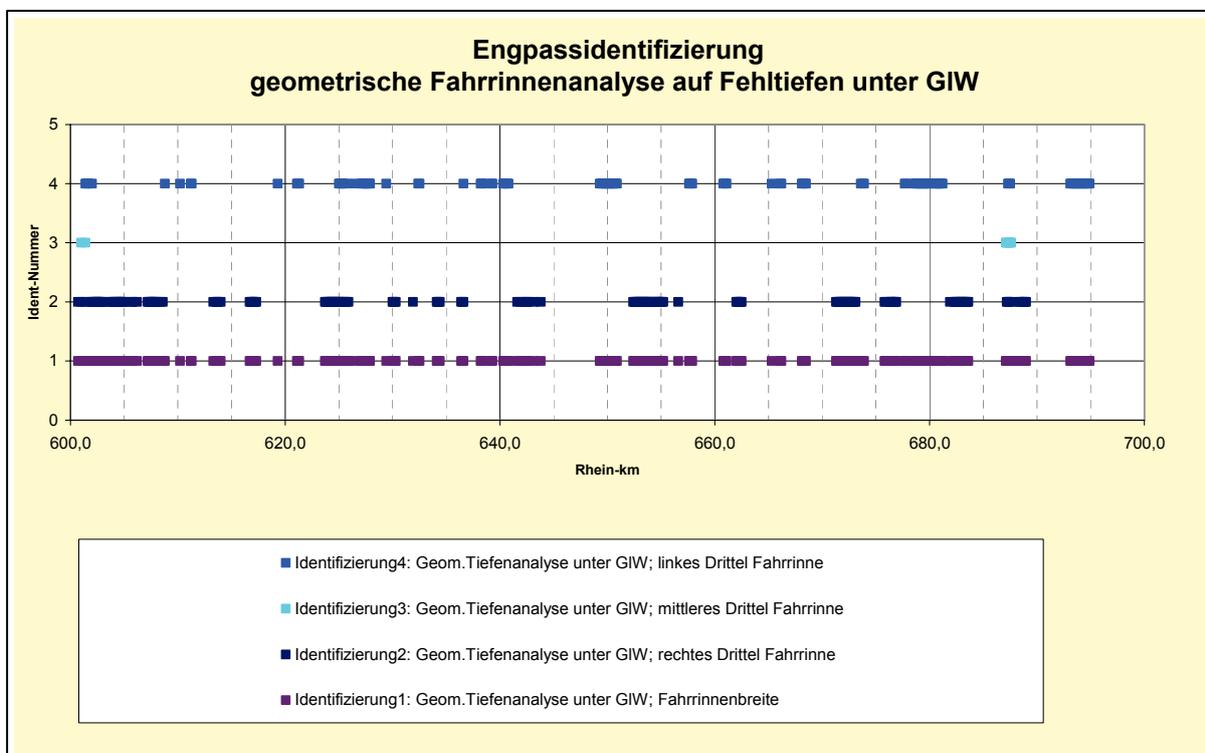
Teilstrecke Rh-km 300,000 -400,000



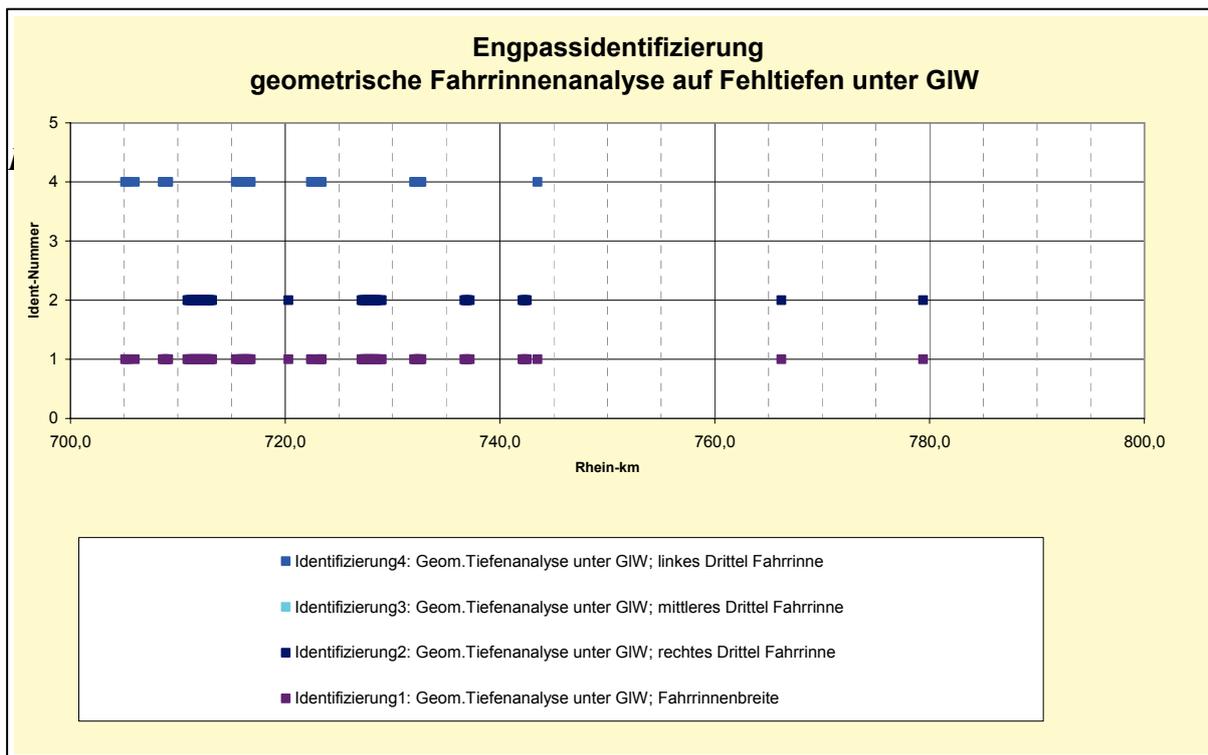
Teilstrecke Rh-km 400,000 -500,000



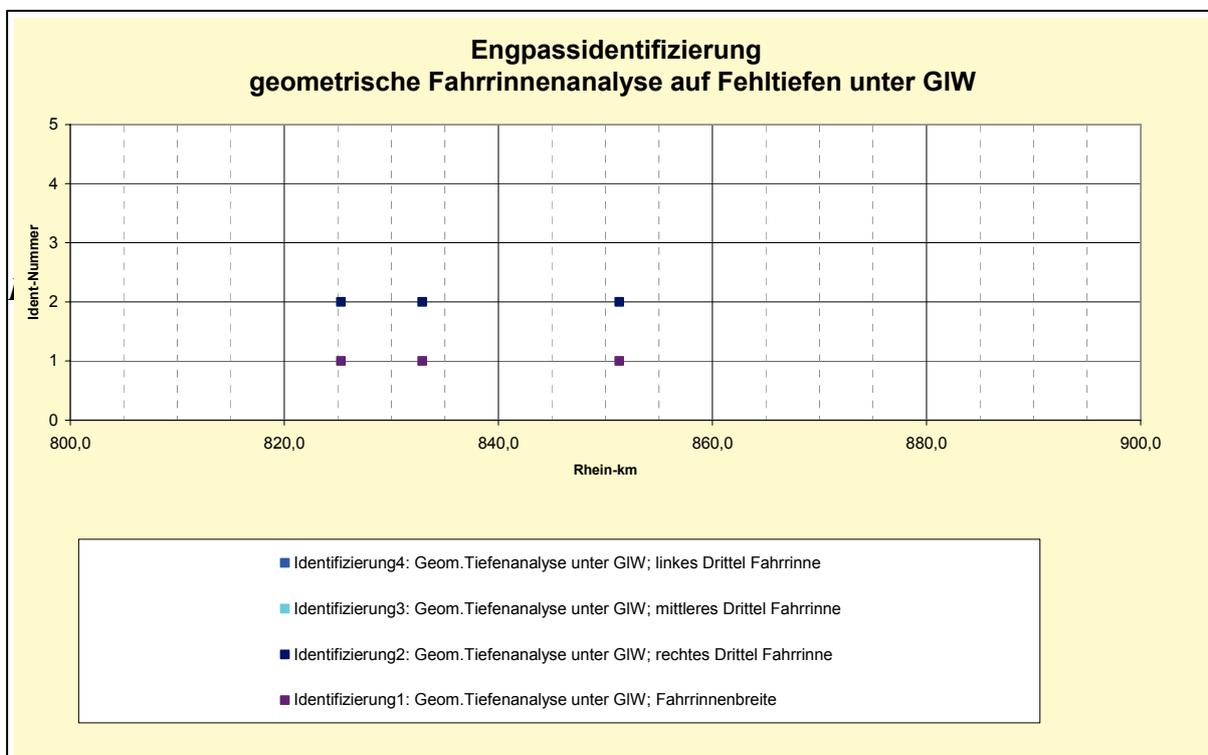
Teilstrecke Rh-km 500,000 -600,000



Teilstrecke Rh-km 600,000 -700,000



Teilstrecke Rh-km 700,000 -800,000



Teilstrecke Rh-km 800,000 -900,000

Anlage 14

abschnittsweise Darstellung zu Bild 35

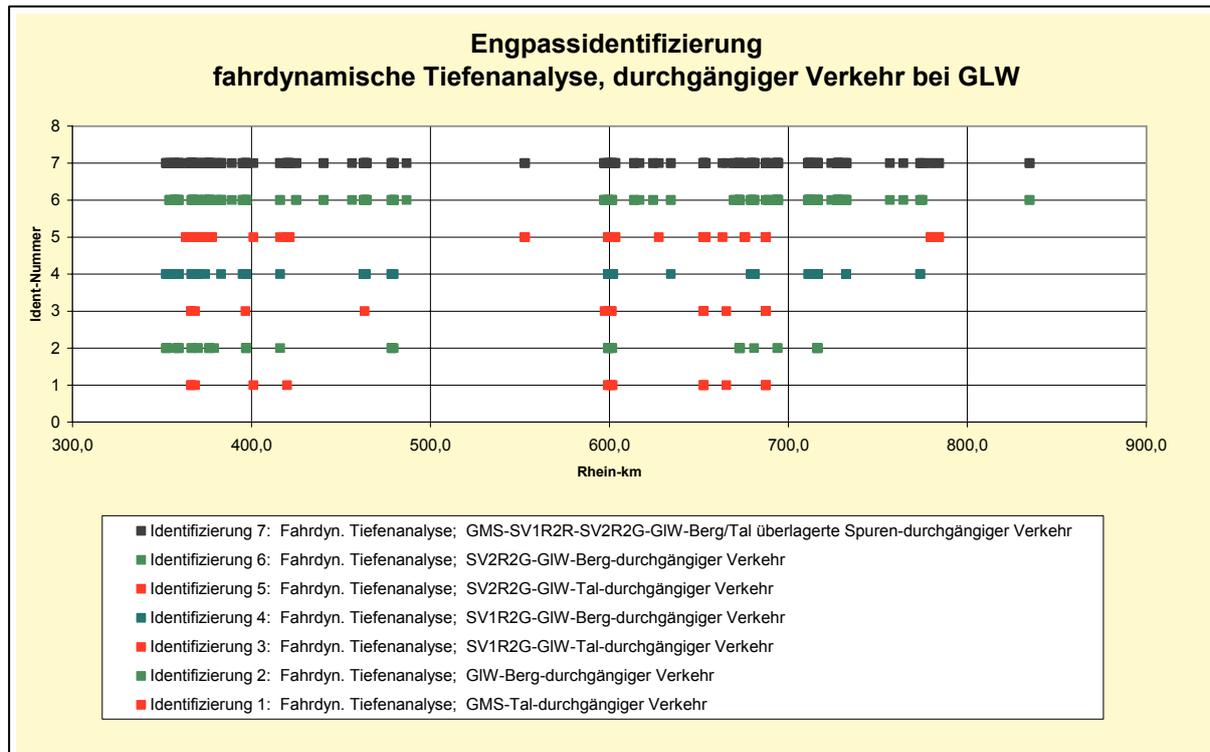
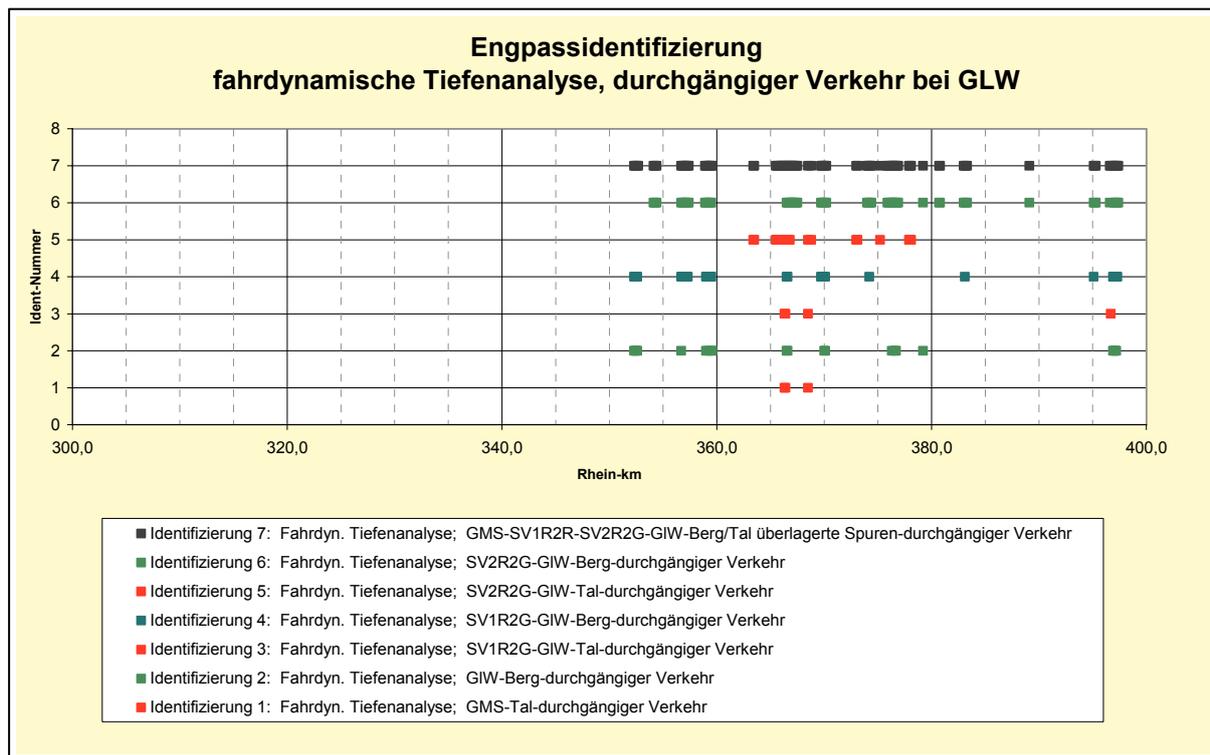
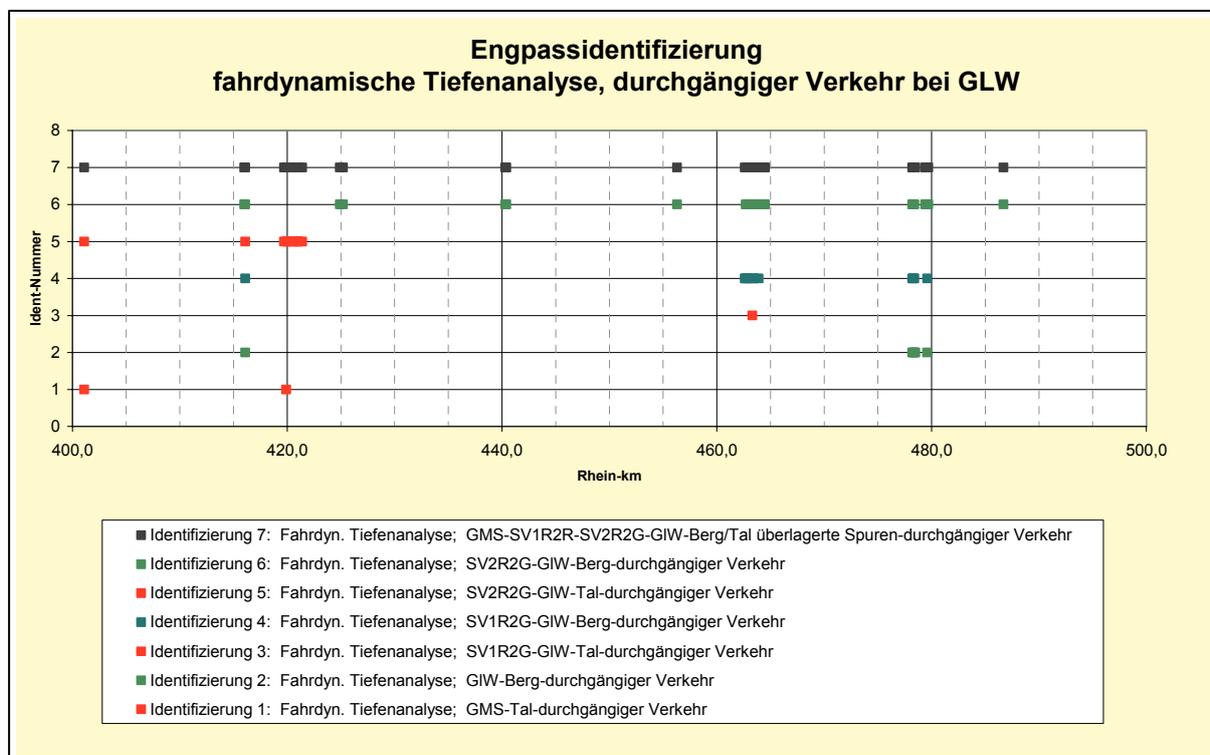


Bild 35: Engpassidentifizierung; fahrdynamische Tiefenanalyse, durchgängiger Verkehr bei GLW 2002

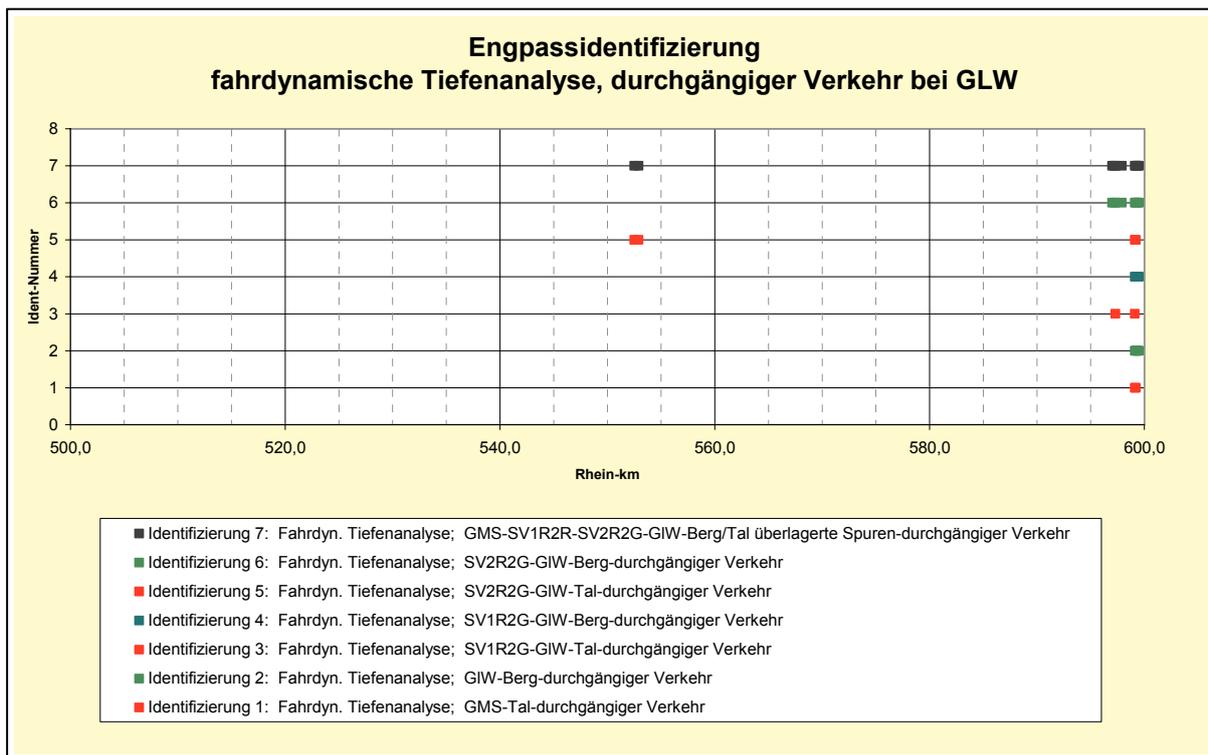
abschnittsweise Darstellung zu Bild 35



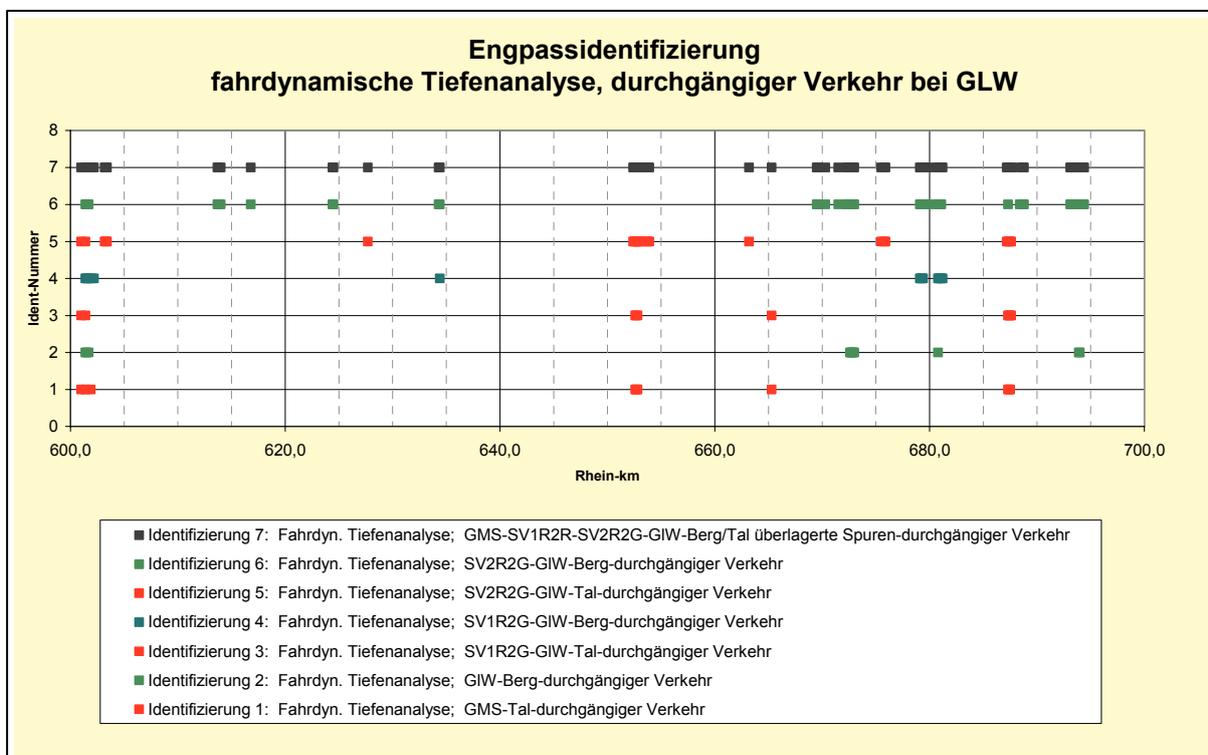
Teilstrecke Rh-km 300,000 -400,000



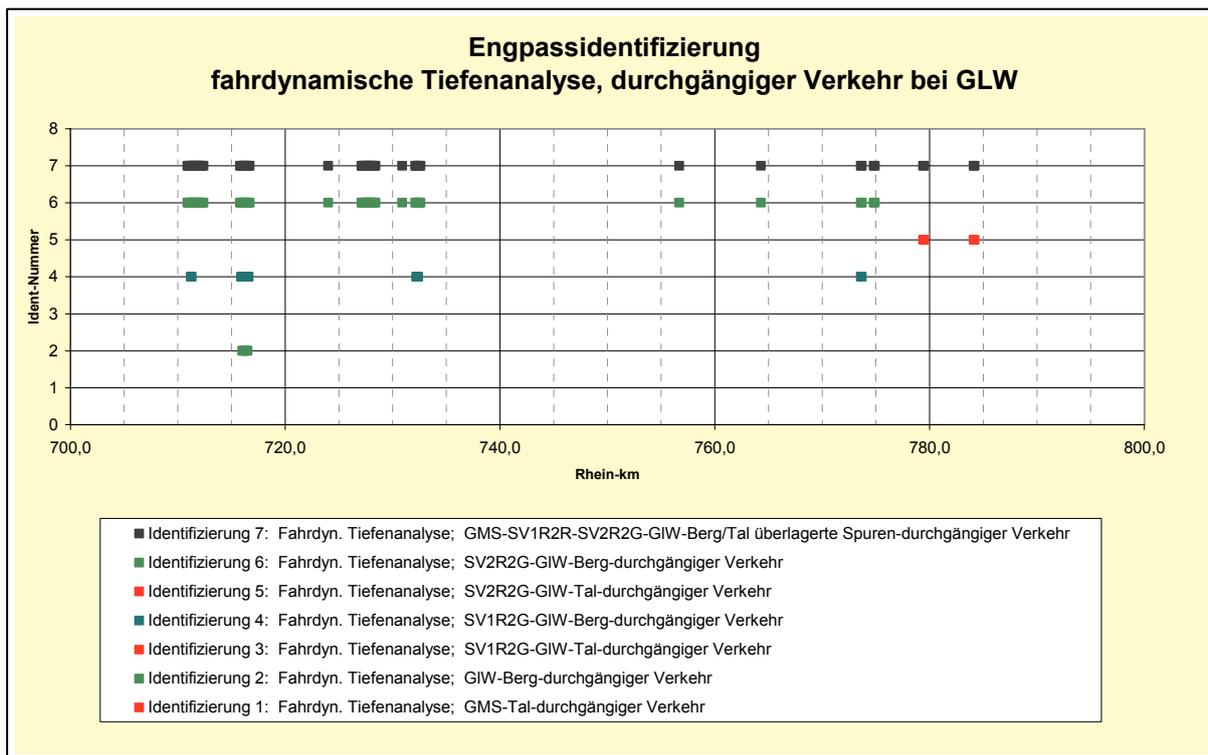
Teilstrecke Rh-km 400,000 -500,000



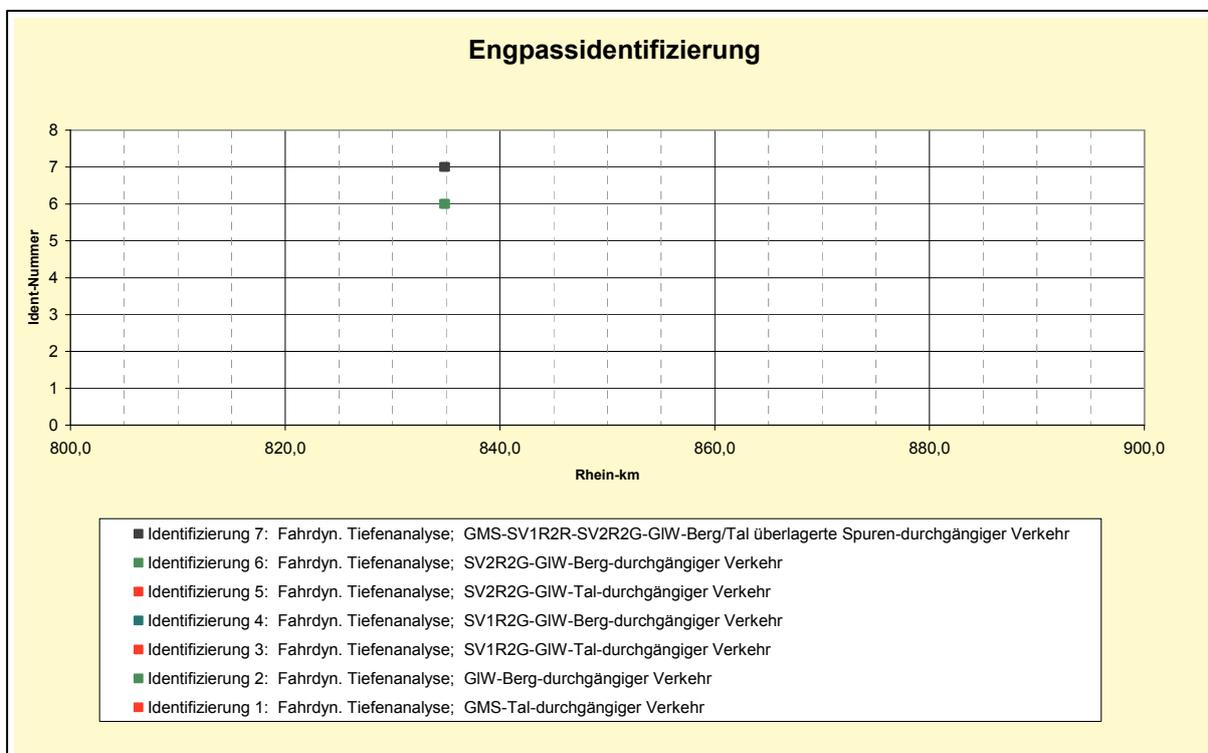
Teilstrecke Rh-km 500,000 -600,000



Teilstrecke Rh-km 600,000 -700,000



Teilstrecke Rh-km 700,000 -800,000



Teilstrecke Rh-km 800,000 -900,000

Anlage 15

abschnittsweise Darstellung zu Bild 36

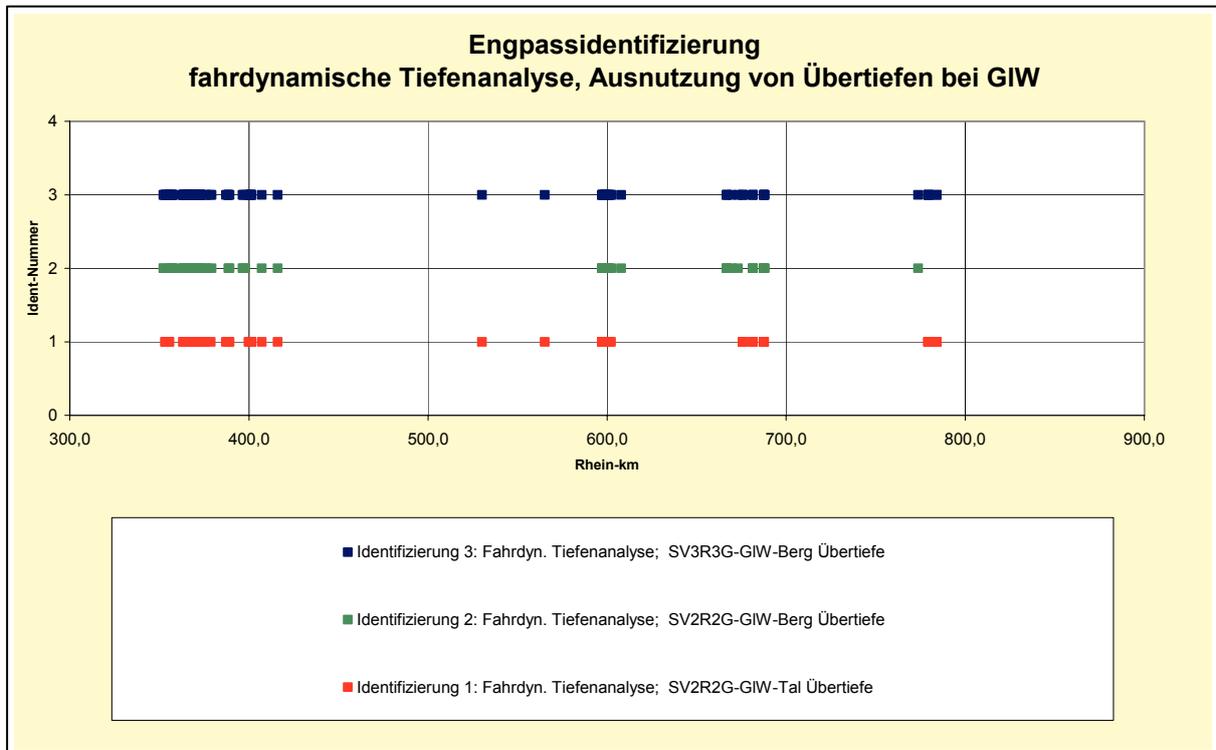
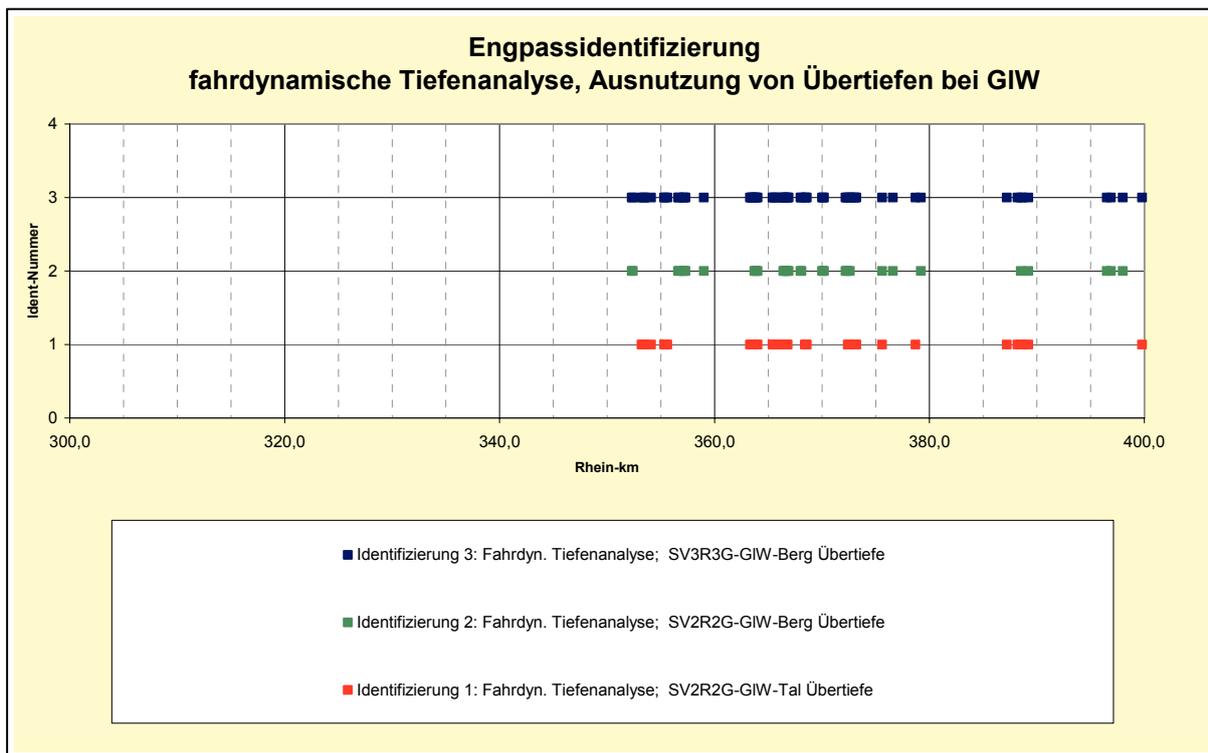
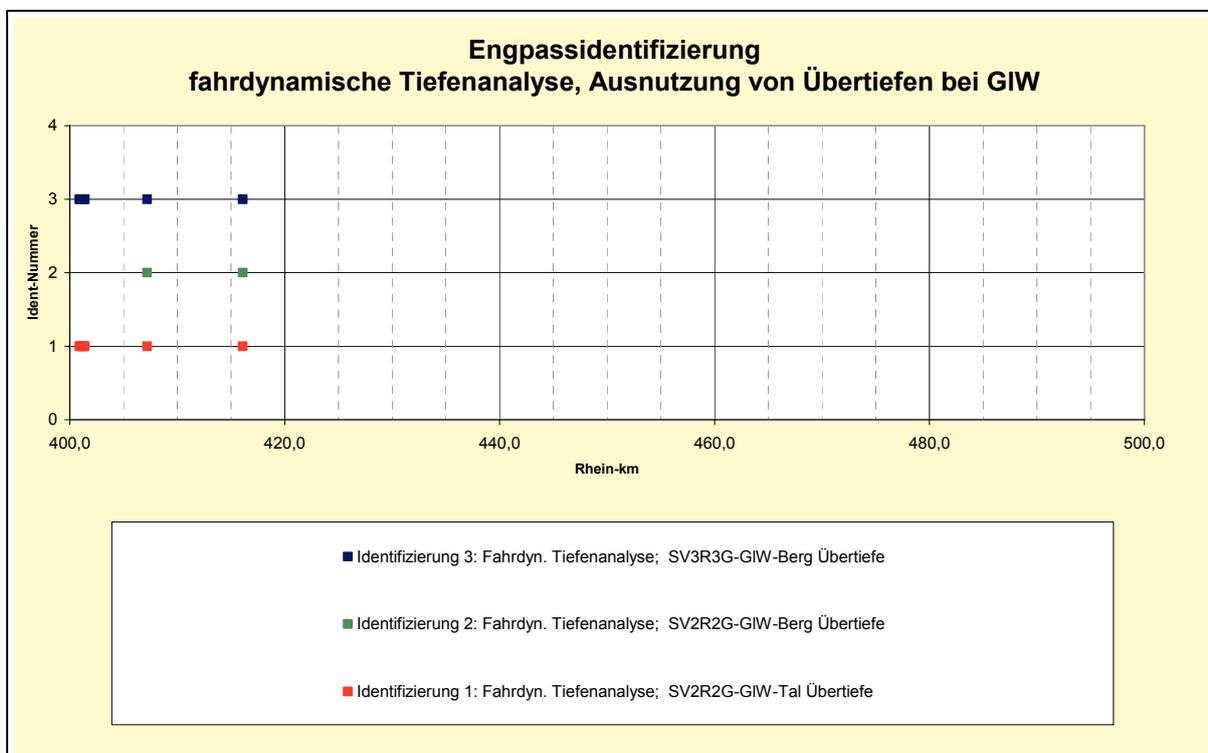


Bild 36: Engpassidentifizierung; fahr-dynamische Tiefenanalyse, Übertiefe bei GLW 2002

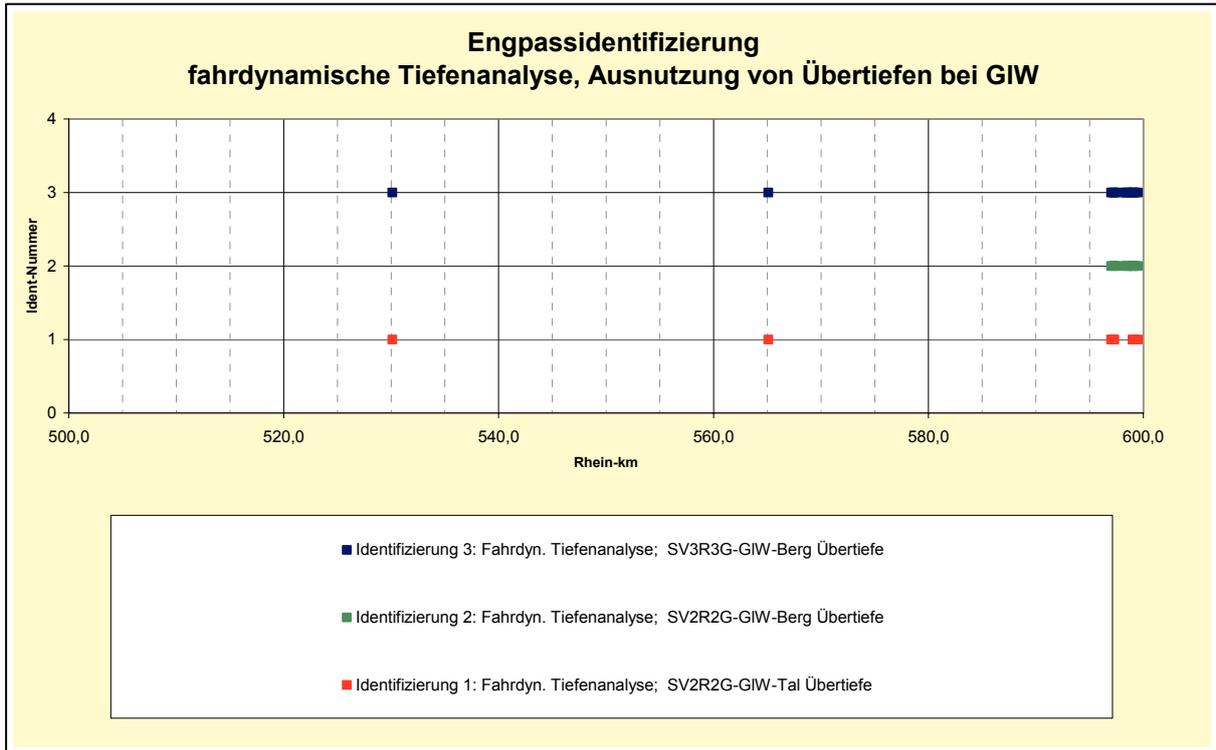
abschnittsweise Darstellung zu Bild 36



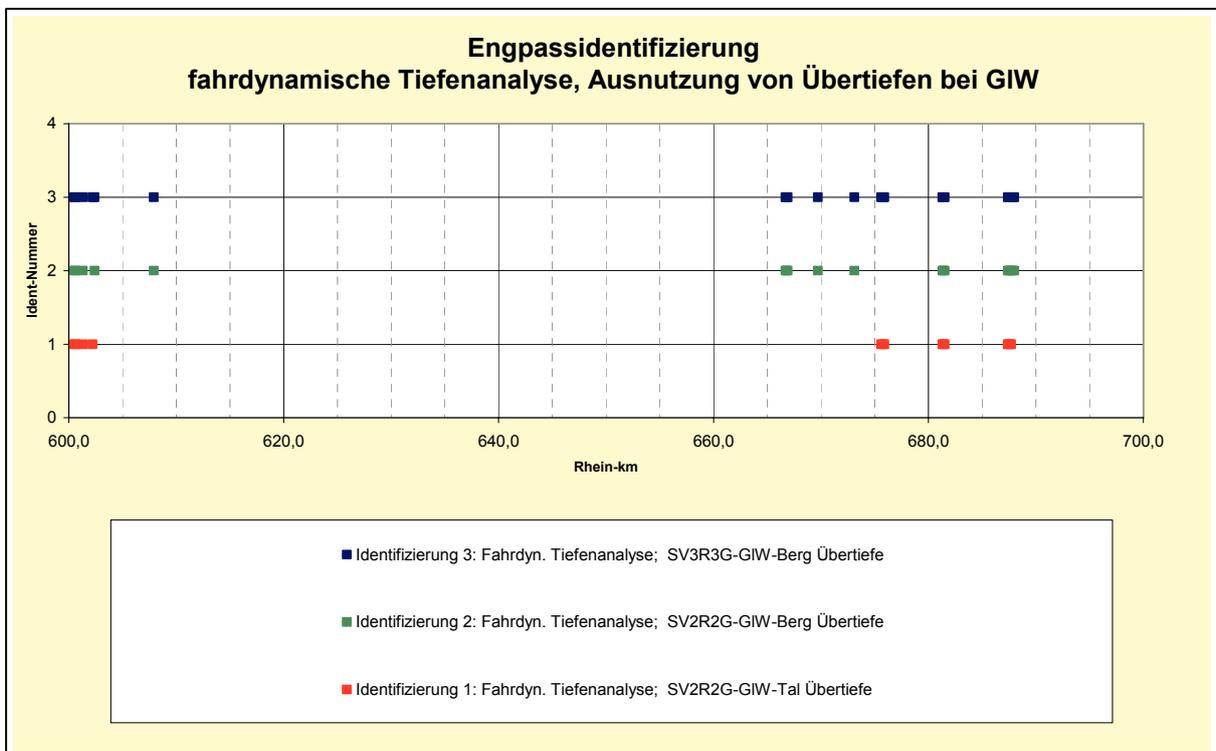
Teilstrecke Rh-km 300,000 -400,000



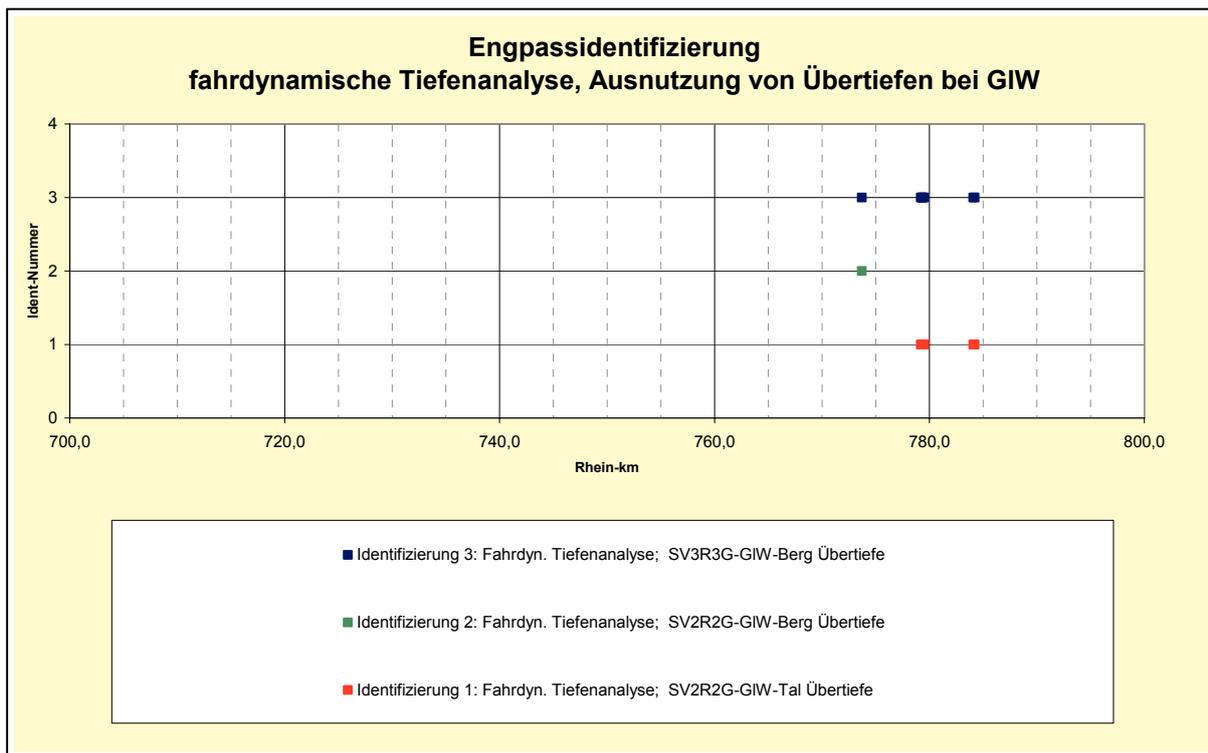
Teilstrecke Rh-km 400,000 -500,000



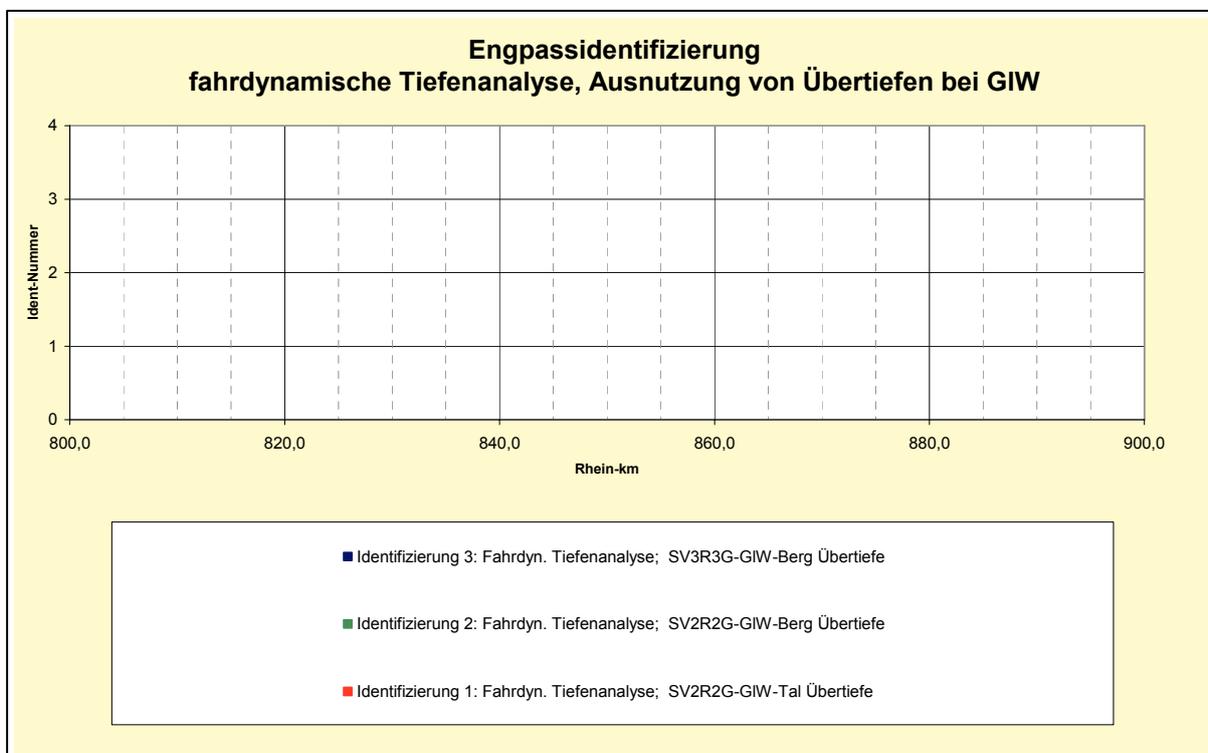
Teilstrecke Rh-km 500,000 -600,000



Teilstrecke Rh-km 600,000 -700,000



Teilstrecke Rh-km 700,000 -800,000



Teilstrecke Rh-km 800,000 -900,000

Anlage 16

abschnittsweise Darstellung zu Bild 37

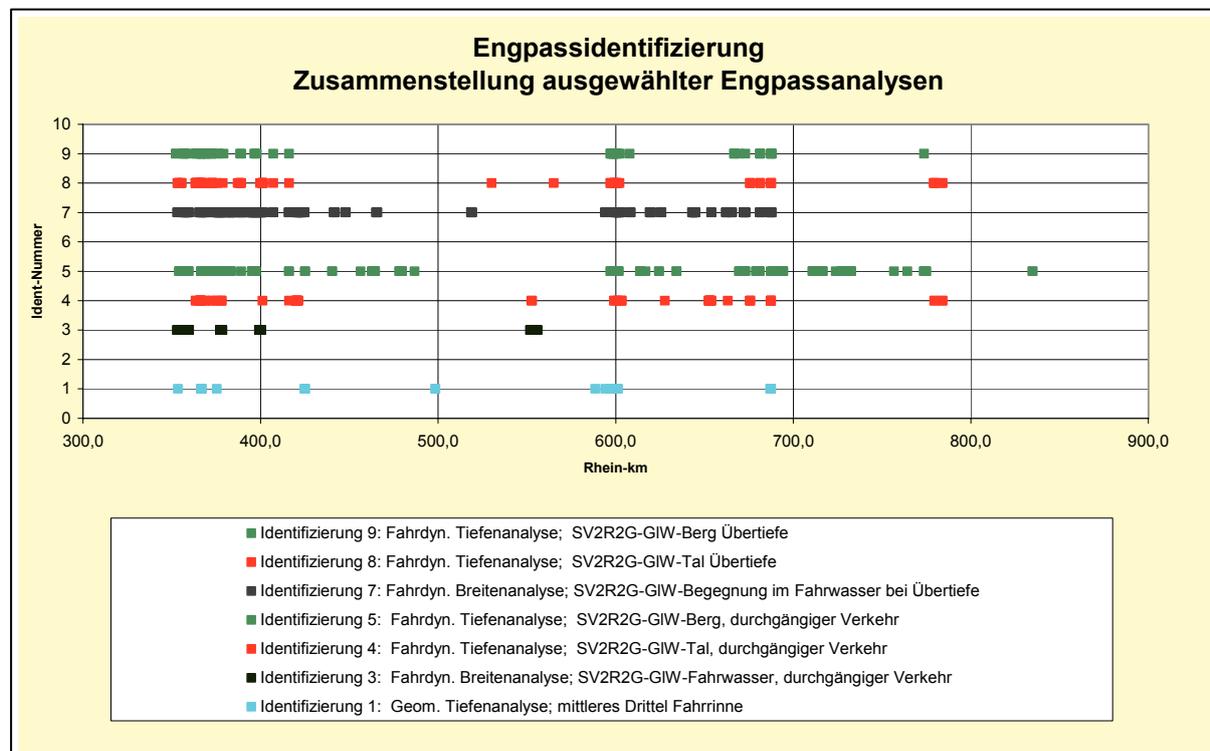
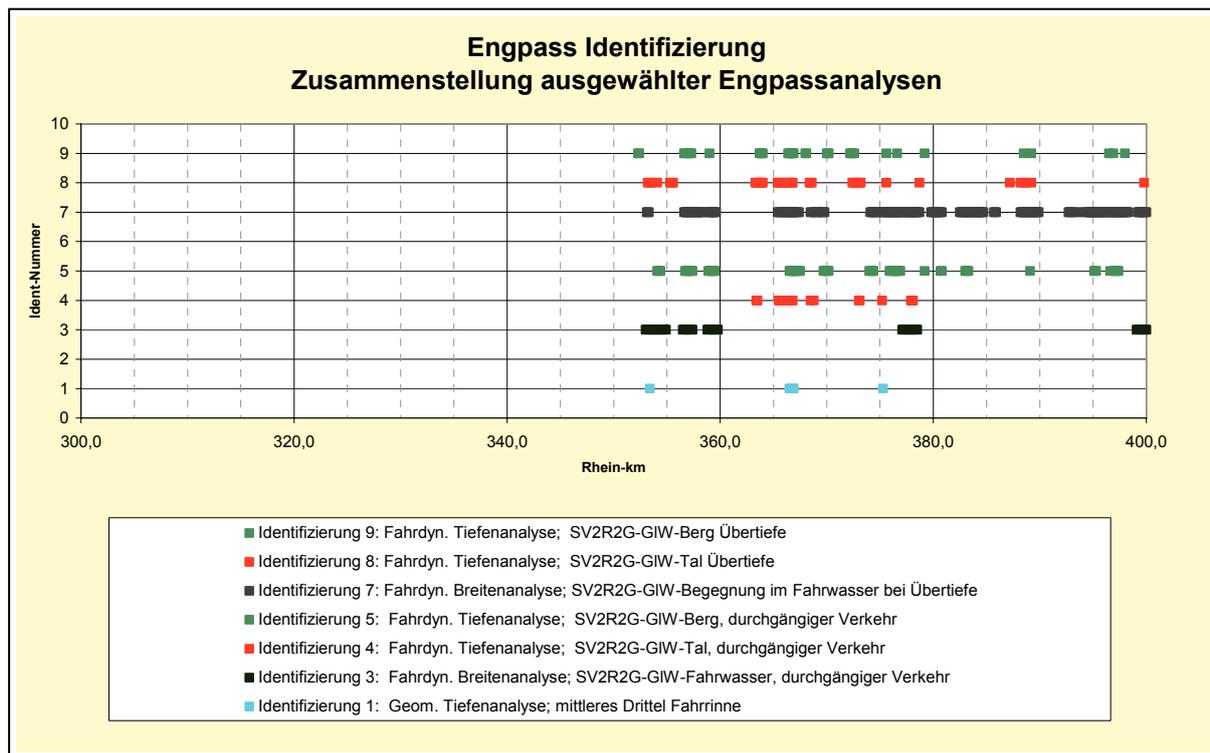
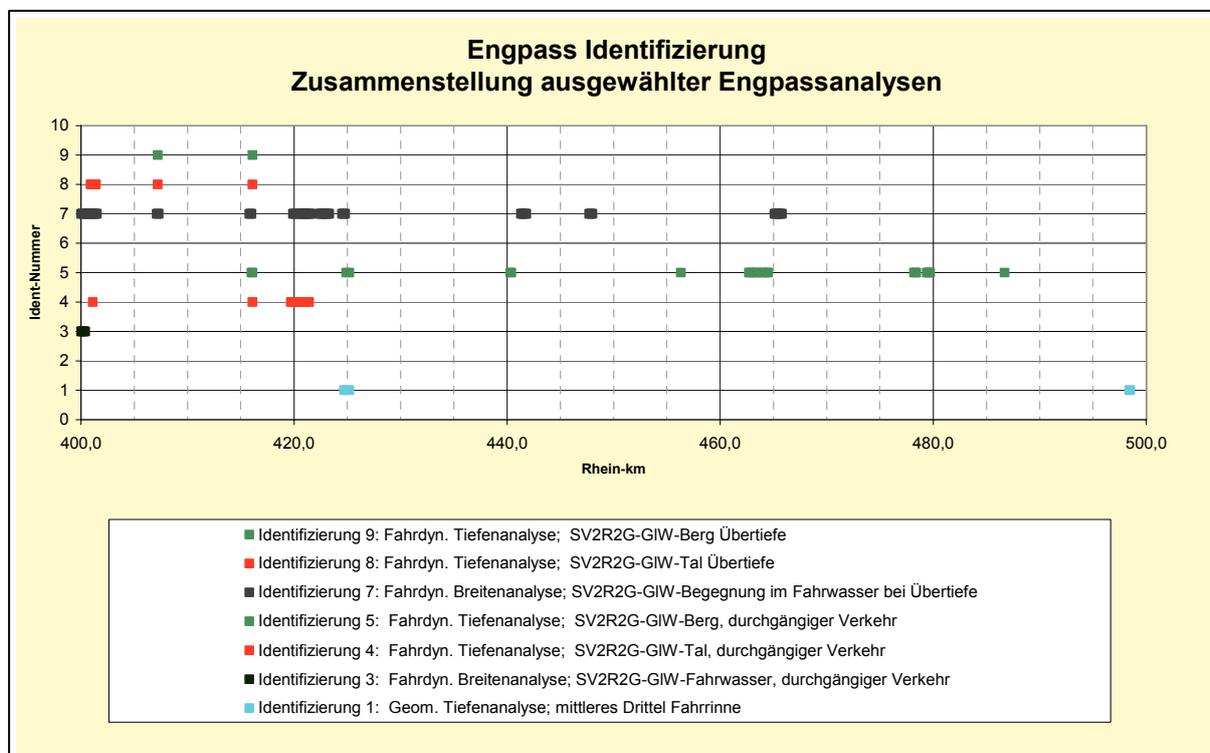


Bild 37: Superposition ausgewählter Engpassidentifizierungen

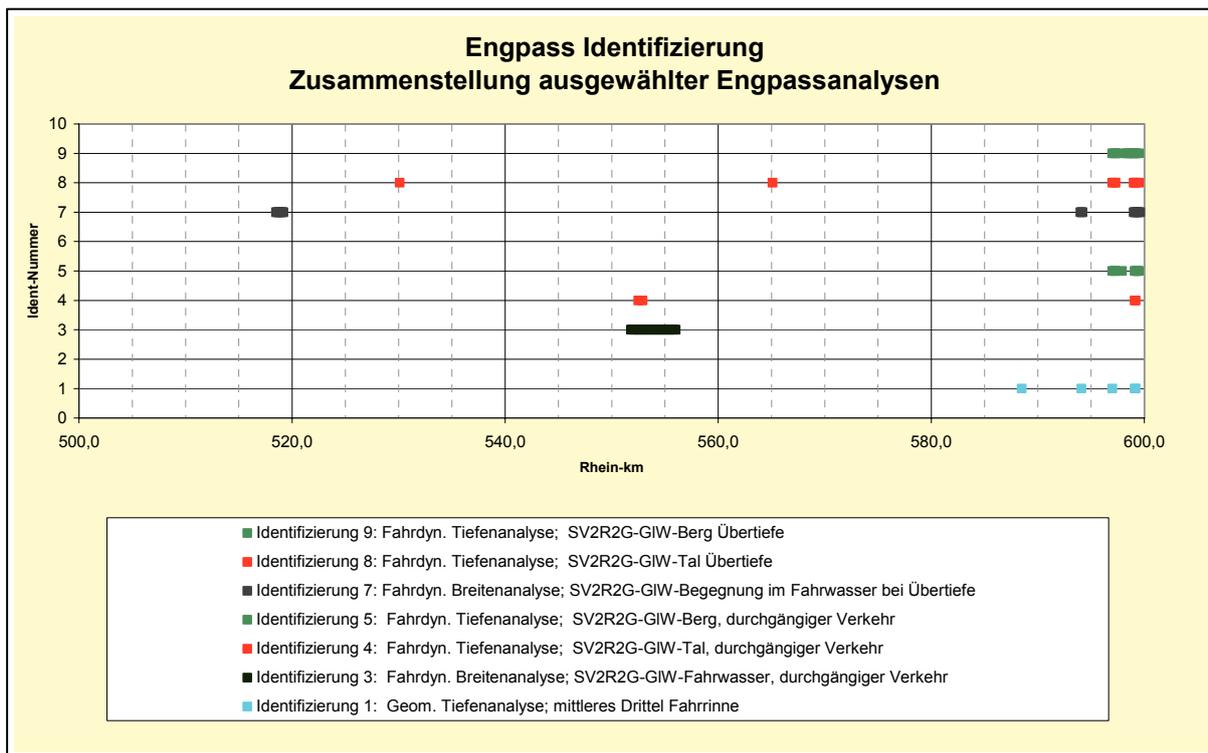
abschnittsweise Darstellung zu Bild 37



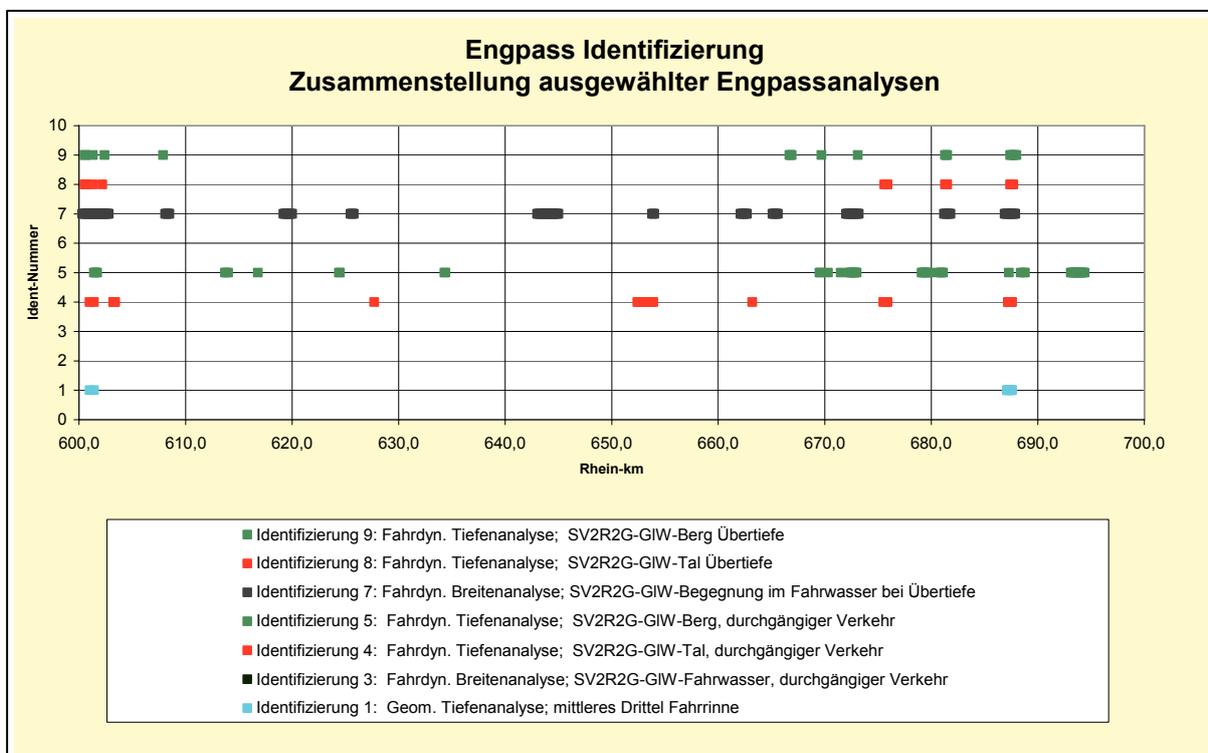
Teilstrecke Rh-km 300,000 -400,000



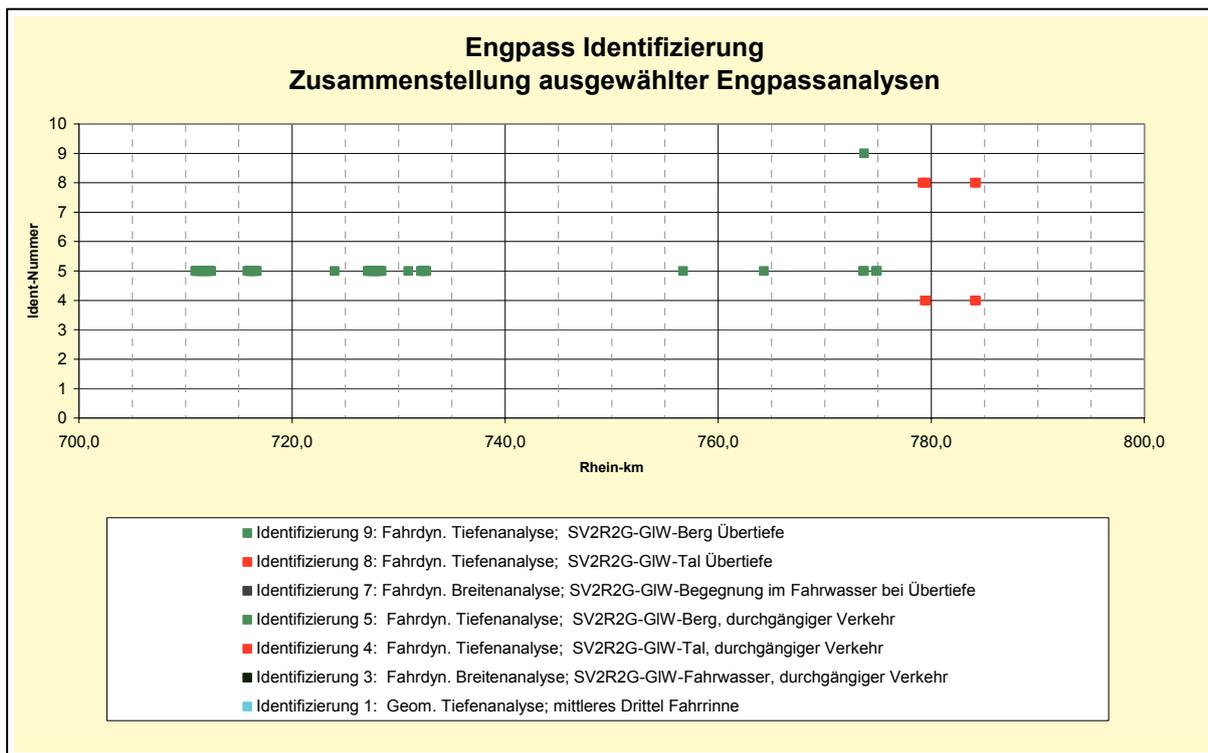
Teilstrecke Rh-km 400,000 -500,000



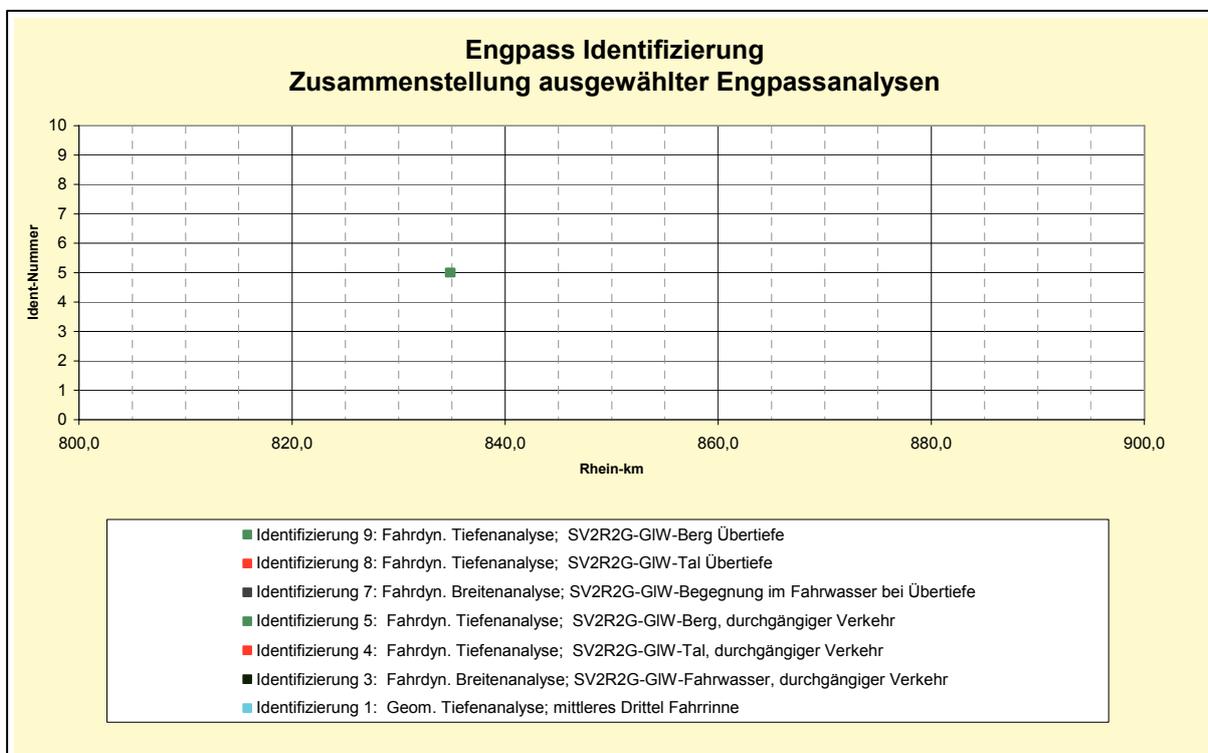
Teilstrecke Rh-km 500,000 -600,000



Teilstrecke Rh-km 600,000 -700,000



Teilstrecke Rh-km 700,000 -800,000



Teilstrecke Rh-km 800,000 -900,000