

## **Fahrdynamikbasierte Entscheidungsmodelle zur mikroskopischen Simulation des Verkehrsflusses auf Binnenwasserstraßen**

Dipl.-Phys. Nicolas Fischer, Technische Universität Dresden

Dr. Martin Treiber, Technische Universität Dresden

Prof. Dr. Ostap Okhrin, Technische Universität Dresden

### **Einleitung**

Engstellen auf Wasserstraßen beeinflussen nicht nur einzelne Fahrzeuge, sondern können sich negativ auf den gesamten Verkehrsfluss auswirken. Dabei unterliegen die Schiffe fahrdynamischen Restriktionen, die ihrerseits die Handlungen der Schiffsführer und deren Entscheidungen zu sicheren Begegnungen und Überholungen beeinflussen. Zur Untersuchung der Auswirkung von Engstellen werden Modelle zu den fahrdynamischen Eigenschaften von Binnenschiffen und neu entwickelte Verhaltensmodelle der Schiffsführer zu dem hier vorgestellten mikroskopischen Verkehrsflussmodell vereint.

### **Modellbeschreibung**

Das hier vorgestellte Verkehrsflussmodell nutzt einen mikroskopischen, eindimensionalen, spurgebundenen Ansatz, bei dem jedes Schiff mit individuellen Attributen simuliert wird. Es baut auf dem bereits durch Fischer et al. (2014) und Fischer und Treiber (2015) beschriebenen Modell auf. Die Modellierung der Fahrdynamik nutzt querprofilbasierte Daten des Flusses, wie das Wassertiefen- und Strömungsgeschwindigkeitsprofil. Auf Basis dieser Daten kann zusammen mit den schiffsspezifischen Attributen nach Wassermann et al. (2010) der Widerstand und der von der eingesetzten Maschinenleistung  $P$  abhängige Schub bestimmt werden, welche zusammen eine Bewegungsgleichung für die Beschleunigung  $a(P)$  des Schiffes ergeben. Bei gesetzter Maschinenleistung kann diese integriert werden, um die neue Schiffsgeschwindigkeit und -position zu erhalten.

Zur Ermittlung von Engstellen wird die verfügbare Verkehrsfläche unter Berücksichtigung des aktuellen Tiefgangs und Squats mit der erforderlichen Verkehrsfläche verglichen. Diese erforderliche Verkehrsfläche kann, wie von Feierfeil (2015) vorgestellt, in Form verschiedener Zusatzbreiten bestimmt werden. Insbesondere sind dies die Zusatzbreiten in Kurvenfahrt nach Niesler (2012), in Querströmungsfeldern nach Söhngen et al. (2012) und im Bereich von Buhnen nach Söhngen und Feierfeil (2013). Außerdem werden Sicherheitsabstände zum Ufer und zu anderen Schiffen berücksichtigt. Die Zusatzbreiten sind geschwindigkeits- und damit maschinenleistungsabhängig und können zu Einschränkungen der vom Schiffsführer einsetzbaren Maschinenleistung führen.

Die Aufgabe im Rahmen der Verkehrssimulation ist es, diese vom Schiffsführer eingesetzte Maschinenleistung unter Berücksichtigung der verfügbaren Verkehrsfläche zu bestimmen. Außerdem muss auf Situationen wie Begegnungen oder Überholmanöver angemessen reagiert werden. Dabei wird von der Grundannahme ausgegangen, dass der Schiffsführer eine feste Wunschmaschinenleistung  $P_w$  einsetzt und von dieser nur in Ausnahmen abweicht. Im Rahmen der Modellentwicklung konnten einige dieser Ausnahmen identifiziert werden, die in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden.

## Freie Fahrt

Unter freier Fahrt wird hier die Fahrt ohne Interaktion mit anderen Schiffen verstanden. Es ist für den Schiffsführer jedoch erforderlich, die Maschinenleistung an äußere Bedingungen anzupassen. So kann z.B. eine Leistungsreduktion erforderlich sein, um an einer Tiefenengstelle den Squat zu verringern. Es werden harte und weiche Grenzen unterschieden. Harte Grenzen müssen auf jeden Fall eingehalten werden und sind für die sichere Fahrt des Schiffes unerlässlich. Weiche Grenzen können über- bzw. unterschritten werden, z.B. wenn die Einhaltung einer harten Grenze dies erfordert.

Die harte untere Grenze  $P_{\min}^h$  ist durch die modellbedingte Minimalgeschwindigkeit und die Minimalgeschwindigkeit aufgrund des Flächenbedarfs gegeben. Fährt ein Schiff langsamer als diese Geschwindigkeiten, kommt es zu einer Überschreitung der verfügbaren Verkehrsfläche, das Schiff läuft auf Grund oder berührt das Ufer. Die weiche untere Grenze  $P_{\min}^w$  ist gegeben durch die nach den jeweiligen Verkehrsregeln erforderliche Minimalgeschwindigkeit, eine Mindestwunschgeschwindigkeit, und eine Mindestgeschwindigkeit zur Einhaltung einer maximalen Zusatzbreite. Die Mindestwunschgeschwindigkeit stellt sicher, dass ein Schiff nicht an einer Stelle stehen bleibt, nur weil kurzzeitig ein erhöhter Leistungseinsatz erforderlich ist, um eine akzeptable Geschwindigkeit zu erreichen.

Die harte obere Grenze  $P_{\max}^h$  ist durch die Maximalgeschwindigkeit aufgrund des Flächenbedarfs, die Annäherung an die kritische Schiffsgeschwindigkeit und die installierte Maschinenleistung gegeben.

Durch die weiche obere Grenze  $P_{\max}^w$  werden die nach den jeweiligen Verkehrsregeln vorgeschriebene Maximalgeschwindigkeit sowie eine Maximalgeschwindigkeit zur Einhaltung einer maximalen Zusatzbreite berücksichtigt. Alle hier genannten Geschwindigkeiten können zur Bestimmung der zugehörigen Leistungsgrenze anhand der Bewegungsgleichung im stationären Fall ( $\dot{v} = 0$ ) in eine Maschinenleistung umgerechnet werden. Die Wahl der in der Simulation vom Schiffsführer eingesetzten Leistung erfolgt nach einer geschachtelten Regel:

$$P_{\text{frei}} = \max(P_{\min}^h, \min(P_{\max}^h, \max(P_{\min}^w, \min(P_{\max}^w, P_w))))$$

Dabei werden die Leistungsgrenzen in einem geschwindigkeitsabhängigen Vorausschaubereich ermittelt, die Leistungsanpassung erfolgt so vor dem Erreichen des leistungseinschränkenden Querprofils. Ein Beispiel für die Wahl der Maschinenleistung unter Berücksichtigung dieser Grenzen ist in Bild 1 gegeben.

## Folgefahrt und gebundener Richtungsverkehr

Werden nicht nur einzelne Schiffe, sondern auch weitere Schiffe in gleicher Fahrtrichtung betrachtet, ist es erforderlich das Modell zu erweitern, damit Sicherheitsabstände zu vorausfahrenden Fahrzeugen eingehalten werden. Zu diesem Zweck wird hier eine abgewandelte Form des Intelligent Driver Models von Treiber et al. (2000) zur Berechnung der Beschleunigung verwendet:

$$a_{\text{IDM}} = a \left[ 1 - \left( \frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 \right], \text{ mit } s^*(v, \Delta v) = s_0 + \max \left( 0, vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}} \right)$$

Nach diesem Modell wird die maximale Beschleunigung  $a$  erreicht, wenn der Abstand  $s$  zum vorausfahrenden Schiff sehr viel größer ist als ein Wunschabstand  $s^*$ . Dieser Wunschabstand setzt sich dabei aus einem Mindestabstand  $s_0$  und einem geschwindigkeitsabhängigen Anteil zusammen, der eine Folgezeit  $T$  und eine komfortable Verzögerung  $b$  berücksichtigt. Dabei wird auch die Annäherungsrate  $\Delta v$  zum Vorderfahrzeug einbezogen.

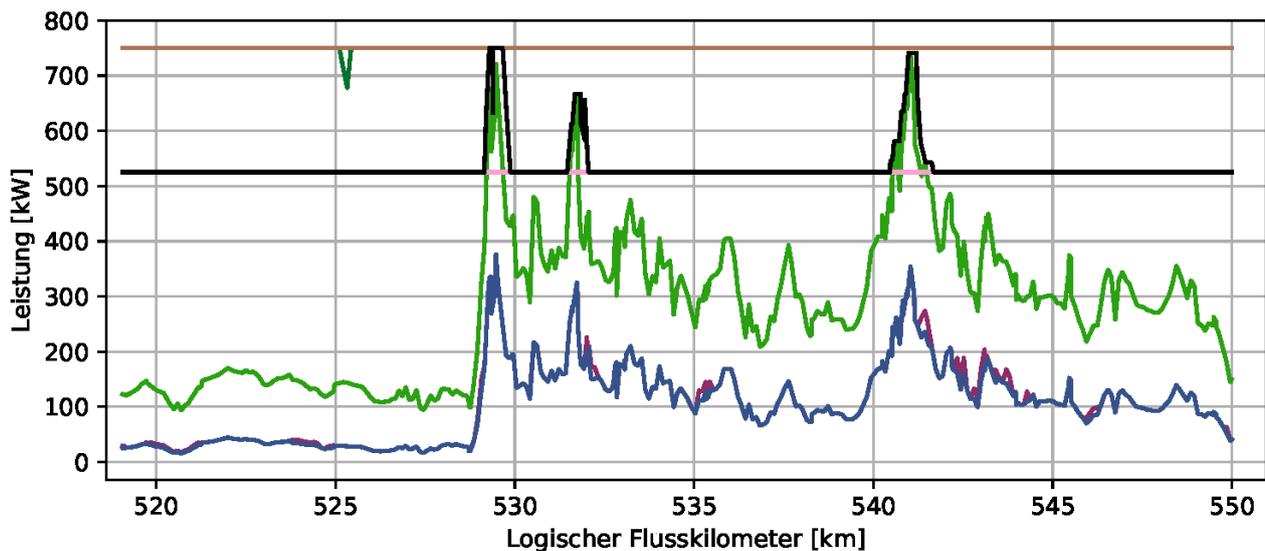


Bild 1: Leistungseinsatz bei Einzelfahrt eines voll abgeladenen Europaschiffes in der Bergfahrt auf dem Mittelrhein bei Mittelwasser. Die schwarze Linie entspricht der gewählten Leistung in der Simulation, die grüne Linie der erforderlichen Leistung zum Einhalten einer Mindestgeschwindigkeit von 1 m/s über Grund. Hier ist es in drei Flussabschnitten erforderlich die Wunschleistung zu überschreiten, um diese Geschwindigkeit nicht zu unterschreiten. Die übrigen Linien entsprechen den weiteren Ober- und Untergrenzen für die Maschinenleistung.

Die durch das IDM bestimmte Beschleunigung in Folgefahrt kann nun durch die Beschleunigung aus dem fahrdynamischen Modell begrenzt werden. Dazu werden zunächst die minimal erlaubte Beschleunigung  $a_{\min} = a(P_{\min}^h)$  und die Wunschbeschleunigung  $a_{\text{frei}} = a(P_{\text{frei}})$  bestimmt. Die Beschleunigung des Schiffes ergibt sich dann mittels  $a_{\text{Schiff}} = \max[a_{\min}, \min(a_{\text{frei}}, a_{\text{IDM}})]$ . Auf diesem Weg wird sichergestellt, dass die realisierte Beschleunigung im fahrdynamisch möglichen Bereich liegt und die verschiedenen Anforderungen an die Leistungsgrenzen erfüllt werden.

### Begegnungen und Überholmanöver

Im Rahmen von Begegnungen und Überholmanövern muss der Flächenbedarf für verschiedene Kombinationen von Schiffen ermittelt werden. Dabei wird zwischen dem agierenden Schiff, das seine Maschinenleistung anpassen muss und den übrigen beteiligten Schiffen, deren Maschinenleistung als konstant angenommen wird, unterschieden. Auf diesem Wege kann unter Berücksichtigung der einzelnen erforderlichen und verfügbaren Breiten und Sicherheitsabstände querprofilweise eine obere und untere Leistungsgrenze für das agierende Schiff bestimmt werden, mit der in der betrachteten Situation gefahren werden kann. Kann kein fahrbarer Leistungsbereich ermittelt werden, handelt es sich um eine Engstelle. Beispielfhaft ist in Bild 2 der Fall einer Begegnung ohne Einschränkung gezeigt, während bei der Begegnung in Bild 3 Engstellen die möglichen Begegnungsbereiche einschränken.

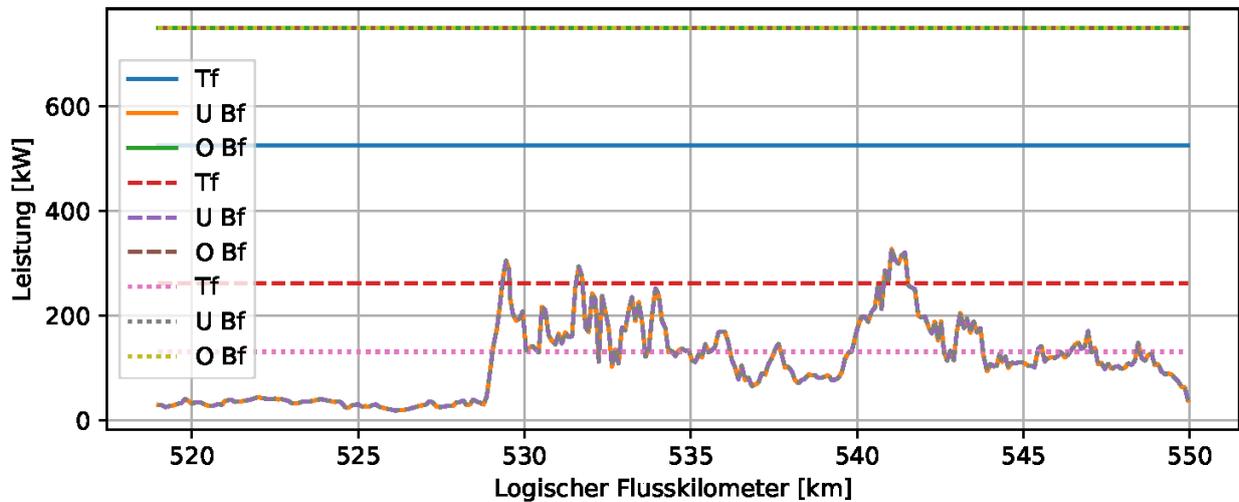


Bild 2: Obere (O Bf) und untere (U Bf) Grenze für die Maschinenleistung eines voll abgeladenen, bergfahrenden Europaschiffes bei Begegnung mit einem leer zu Tal fahrenden Europaschiff auf dem Mittelrhein bei Mittelwasser. Für das talfahrende Schiff (Tf) werden drei verschiedene Leistungen (durchgezogen, gestrichelt, gepunktet) und die dazugehörigen oberen und unteren Grenzen der für den Bergfahrer möglichen Maschinenleistungen über den Flussverlauf dargestellt. In diesem Fall ist eine Begegnung in allen Fällen möglich, die oberen und unteren Grenzen sind unabhängig von der Talfahrerleistung und liegen übereinander.

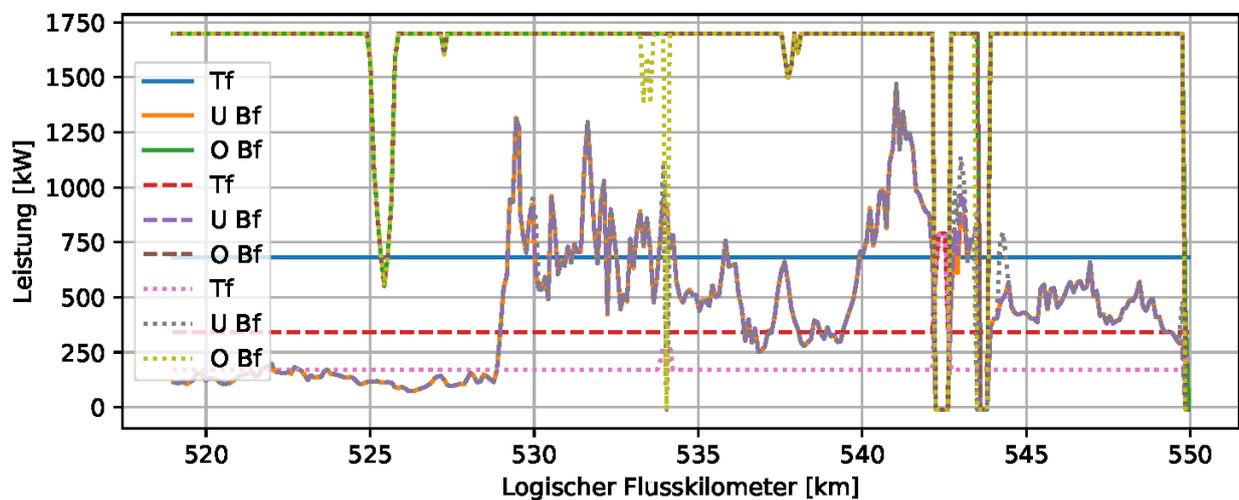


Bild 3: Obere (O Bf) und untere (U Bf) Grenze für die Maschinenleistung eines voll abgeladenen, bergfahrenden 4er-Koppelverbandes bei Begegnung mit einem leer zu Tal fahrenden 4er-Koppelverband auf dem Mittelrhein bei Mittelwasser. Für den talfahrenden Verband (Tf) werden drei verschiedene Leistungen (durchgezogen, gestrichelt, gepunktet) und die dazugehörigen oberen und unteren Grenzen der für den Bergfahrer möglichen Maschinenleistungen über den Flussverlauf dargestellt. In verschiedenen Bereichen konnte keine für den Bergfahrer fahrbare Leistung ermittelt werden, es handelt sich um Engstellen. So liegen im Bereich zwischen km 540 und 545 zwei enge Kurven, in denen die Begegnung nicht möglich ist. Eine weitere Engstelle im Bereich um km 534 (ebenfalls eine Kurve) entsteht erst, wenn der Talfahrer mit einer sehr niedrigen Leistung fährt.

Im Falle einer Begegnung kann der Bergfahrer den Begegnungsbereich durch Änderung der gewünschten Maschinenleistung  $P_w$  verlagern. Insbesondere kann er vor einer Engstelle warten und die Maschinenleistung in der Warteposition im gleichen Zuge so wählen, dass die Begegnung an diesem Ort möglich ist. Für Überholmanöver lässt sich überprüfen, ob innerhalb der Überholstrecke Engstellen vorliegen und der Wunsch des Schiffsführers ein vorausfahrendes Fahrzeug zu überholen ggf. unterbinden.

### Beispielszenario einer Begegnung

Als Beispiel wird erneut die Begegnung zweier 4er-Koppelverbände herangezogen. Die Anfangspositionen der beiden Schiffe sind so gewählt, dass die Begegnung in der flussaufwärtigen Engstelle zwischen km 540 und 545 erfolgt. Der Bergfahrer reduziert in der Simulation jedoch die Maschinenleistung, um vor der Engstelle zu warten und die Begegnung zwischen die beiden Engstelle zu legen (s. Bild 4).

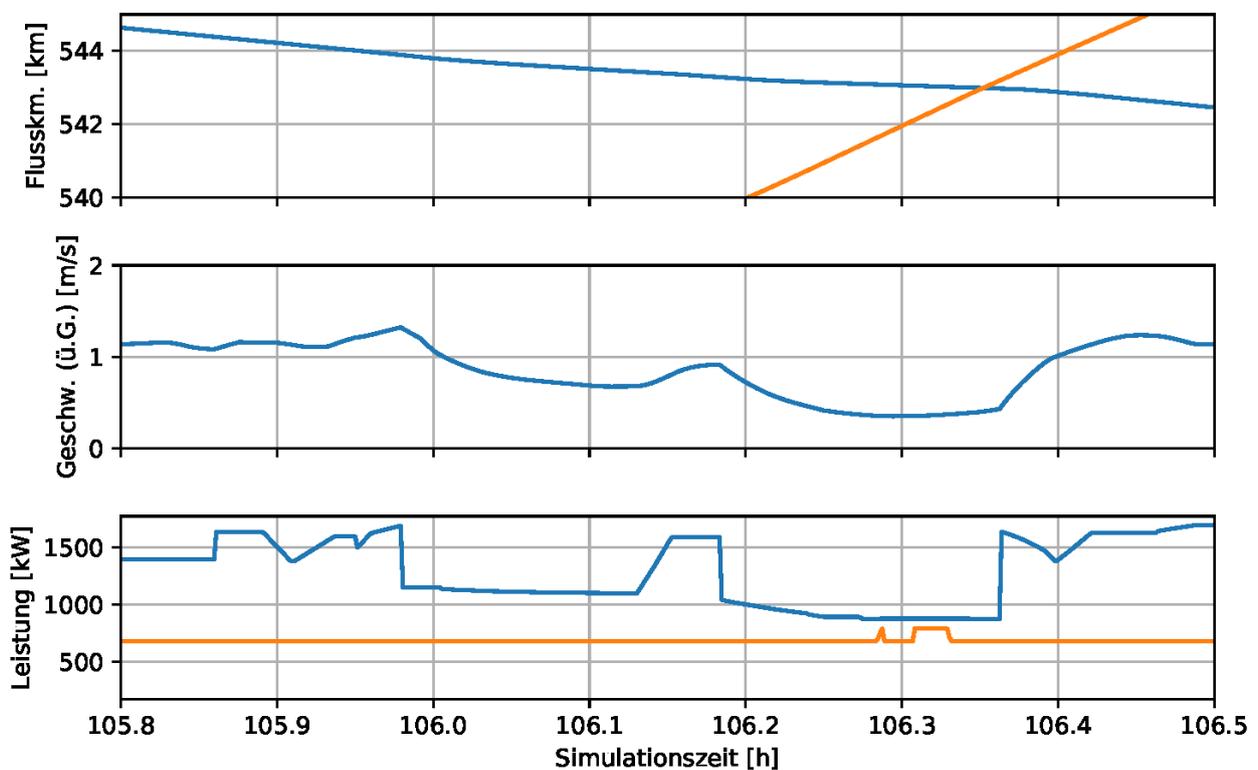


Bild 4: Simulation der Begegnung zweier 4er-Koppelverbände im Bereich der beiden Engstellen zwischen km 540 und 545. Der Bergfahrer (blau) reduziert vor der Begegnung die Leistung und damit die Geschwindigkeit, um zwischen den Engstellen zu warten und den Talfahrer (orange) passieren zu lassen. Die zwischenzeitliche Leistungserhöhung vor Simulationszeit 106.2 ist durch die erste Engstelle bedingt, die der Bergfahrer nur mit einer höheren Geschwindigkeit durchfahren kann.

## Zusammenfassung

Bei der mikroskopischen Simulation des Schiffsverkehrs ist es wichtig, die starke Abhängigkeit der Fahrdynamik des einzelnen Schiffes von seiner Umgebung zu berücksichtigen. In diesem Beitrag haben wir eine Vorgehensweise dargestellt, die auf Basis der Maschinenleistung eine Anpassung des Schiffsführerverhaltens an die äußeren Gegebenheiten ermöglicht. Darüber hinaus lässt sich dieses Vorgehen auf ein Verhaltensmodell für Begegnungen und Überholmanöver übertragen.

## Literatur

- Feierfeil, T. (2015): Ermittlung notwendiger Fahrrinnenbreiten auf Basis von Naturmessungen. In Tagungsband Wechselwirkung Schiff/Wasserstraße mit Auswirkungen auf Nautik und schiffsinduzierte Belastungen, S. 45-51.
- Fischer, N., Treiber, M. (2015): Mikrosimulation des Schiffsverkehrs am Beispiel des Rheins. In Tagungsband Wechselwirkung Schiff/Wasserstraße mit Auswirkungen auf Nautik und schiffsinduzierte Belastungen, S. 63-70.
- Fischer, N., Treiber, M., Söhngen, B. (2014): Modeling and Simulating Traffic Flow on Inland Waterways. In Proceedings of the XXXIIIth PIANC World Congress, San Francisco.
- Niesler, H. (2012): Bericht zu den Untersuchungen zum cf-Wert. Bericht des Ingenieurbüros Schmid, Kapsweyer.
- Söhngen, B., Feierfeil, T. (2013): Ermittlung notwendiger Sicherheitsabstände von Binnenschiffen zu Bühnen aus Modellversuchen und Simulationsergebnissen. Bericht der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.
- Söhngen, B., Maedel N., Hahne, L. Verdugo, I., Iribarren, J. (2012): Additional navigational widths of inland vessels passing cross current fields. PIANC On Course, January 2012.
- Treiber, M., Hennecke, A., Helbing, D. (2000): Congested Traffic States in Empirical Observations and Microscopic Simulations. Phys. Rev. E, Volume 62, Issue 2, S. 1805-1824.
- Wassermann S., Söhngen B., Dettmann, T., Heinzelmann, C. (2010): Investigations to define minimum fairway widths for inland navigation channels. In PIANC World Congress, Liverpool.