

Zusammenfassung Fahrdynamik

Fahrdynamik allgemein

Damit die Wirkung der einzelnen Varianten für den Lückenschluss zwischen Straubing und Vilshofen bewertet werden kann, sind die Wechselwirkungen zwischen Schiff und Wasserstraße zu überprüfen. Dazu sind fahrdynamische Untersuchungen erforderlich, mit denen eine Betrachtung der Fahrwasserverhältnisse und deren Einfluss auf die Schifffahrt möglich ist. Über die Fahrdynamik werden Ausbauparameter, wie z. B. die Fahrrinnenbreite und die möglichen Abladetiefen der Planungsvarianten bestimmt und letztendlich auch die Sicherheit und Leichtigkeit der Wasserstraße überprüft.

Die Untersuchungen zur Fahrdynamik wurden vom Arbeitsteam Fahrdynamik koordiniert und durchgeführt. Das Arbeitsteam Fahrdynamik besteht aus folgenden Mitgliedern: Bundesanstalt für Wasserbau (Leitung), Versuchsanstalt für Binnenschiffbau, Wasser- und Schifffahrtsamt Regensburg, Rhein-Main-Donau GmbH, TU München

Fahrdynamische, hydraulische und geometrische Kenngrößen

Zu den wichtigsten Kenngrößen zählen

- Schiffstypen
- Fahrspurbreite
- Horizontale Sicherheitsabstände
- Nautisch erforderliche Mindestgeschwindigkeit
- Schiffsgeschwindigkeit (durchs Wasser oder über Grund)
- Fahrdynamisches Einsinken (Absunk)
- Sohlabstand bzw. Flottwasser
- Abladetiefe

Die fahrdynamischen Kenngrößen stehen im engen Zusammenhang zu den Rahmenbedingungen in der Wasserstraße. Offensichtlich z.B. ist der Zusammenhang zwischen Fließtiefe und Abladetiefe. Es kann aber nicht ohne weiterführende Betrachtungen aus der vorhandenen Fließtiefe auf die erreichbare Abladetiefe geschlossen werden, zusätzliche Einflüsse müssen Berücksichtigung finden.

Die Rahmenbedingungen der Wasserstraße ergeben sich aus den hydraulischen und geometrischen Größen, dies sind im wesentlichen:

- Fahrrinnenbreite
- Gerade oder Kurve (Krümmungsradius)
- Querprofilgeometrie
- Fließtiefe
- Fließgeschwindigkeit, Querströmungseinfluss (z.B. durch Buhnen), Gefälle
- Sohlbeschaffenheit (z.B. Fels- oder Kiessohle)

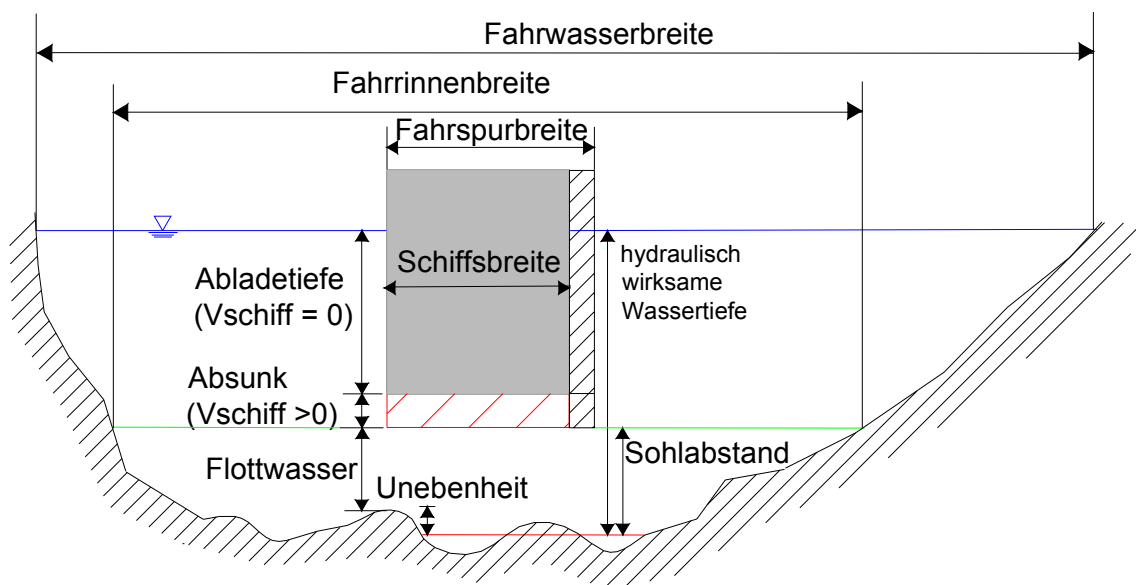


Abb. 1: Definition der Kenngrößen

Für den Donauausbau zwischen Straubing und Vilshofen wurden bei den vertieften Untersuchungen folgende Schwerpunkte gesetzt, um den fahrdynamischen Charakter der Planungsvarianten zu ermitteln:

- a) erforderliche Fahrrinnenbreiten (im Vergleich zu den vorhandenen Breiten), insbesondere horizontale Sicherheitsabstände
- b) Erforderlicher Sohlabstand
- c) Mindestschiffsgeschwindigkeiten
- d) Propulsionseigenschaften
- e) Fahrdynamisches Einsinken

Zu a) erforderliche Fahrinnenbreiten, horizontale Sicherheitsabstände:

Bei den Planungsvarianten wurden unterschiedliche Ausbaustandards (Wasserstraßenklassen) zugrunde gelegt, bei denen verschiedene Begegnungssituationen und Schiffstypen zugelassen sind. Daraus ergeben sich verschieden breite Fahrinnen.

Von der Versuchsanstalt für Binnenschiffbau (VBD) wurden zur Bestimmung der erforderlichen Fahrinnenbreiten zahlreiche Naturmessungen ausgewertet (VBD Bericht 1369). Parameter wie Strömungsgeschwindigkeiten, Krümmungsradien und Schiffstyp fließen in die Betrachtungen mit ein (siehe Abb. 2).

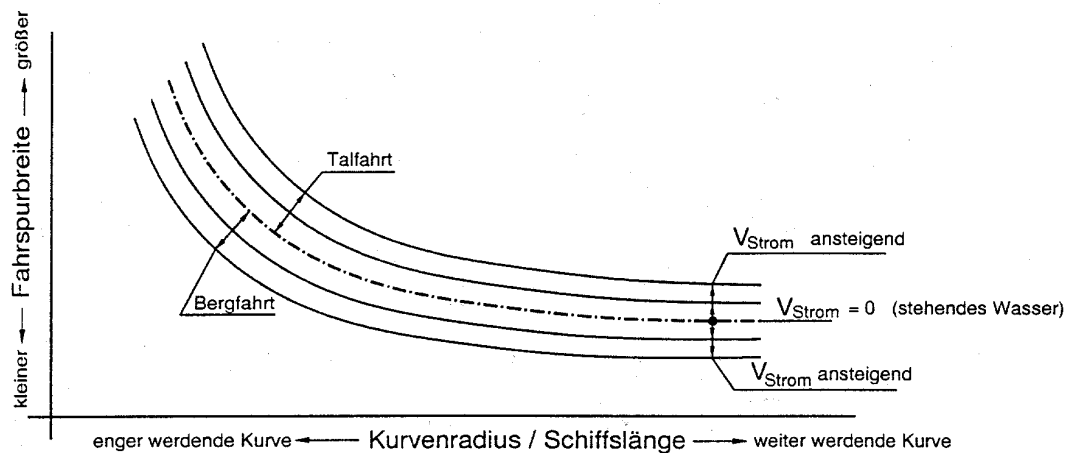


Abb. 2: Kurvenscharen zu den Fahrspurbreiten in Abhängigkeit zum Verhältnis Kurvenradius zu Schiffslänge (VBD Bericht 1503: Vergleich der möglichen Transportleistung anhand der Fahrwassertiefen ausgewählter Wasserstraßenabschnitte von Donau und Rhein)

Bei den Sicherheitsabständen zwischen Schiff und der Uferbegrenzung bzw. zu Bühnen wurde noch ein Optimierungspotential hinsichtlich der Reduzierung der erforderlichen Fahrinnenbreite gesehen. Aufgrund der noch nicht bekannten horizontalen Sicherheitsabstände wurden in der VAO Modellversuche zu dieser Fragestellung durchgeführt. Die Versuche wurden hauptsächlich für Fahrwasserverhältnisse und Rahmenbedingungen, wie sie bei Variante B (verschärfte Flussregelung) vorliegen würden, durchgeführt. Sie ergaben für die Standardbegegnungskombination bei Variante B zwischen einem einspurig-zweigliedrigen Schubverband („Spargel“ $L \times B = 185 \text{ m} \times 11,4 \text{ m}$) zu Tal und einem zweispurig-eingliedrigen Koppelverband ($L \times B = 95 \text{ m} \times 22,8 \text{ m}$) zu Berg eine erforderliche Mindestfahrinnenbreite in der Geraden von 85 m.

Die 85 m Fahrrinnenbreite ergeben sich zu je 10 m Sicherheitsabstand zum Ufer bzw. zu Bühnen und einen Raumbedarf für die Begegnung im Mittel von 65 m. Begegnungen mit mehrspurigen Fahrzeugen sind deshalb im Ist-Zustand, der eine Fahrrinnenbreite in Geraden von durchschnittlich 70 m aufweist, nur unter Ausnutzung des gesamten Fahrwassers und in Ausweichstellen möglich. Für die Begegnung von einspurigen Fahrzeugen kann die Fahrrinnenbreite aufgrund der geringeren Raumbedarfswerte auf 70 m reduziert werden. Die Ergebnisse der VBD (Bericht Nr. 1369) wurden durch die Modellversuche gestützt.

Für Kurven ergeben sich größere Fahrspurbreiten (siehe R/L – Verhältnis). Deutliche Verbreiterungen gegenüber der Geraden sind notwendig, um auch in Flusskrümmungen begegnen zu können. Die Ergebnisse der Modelluntersuchungen stützen die im VBD – Bericht 1369 angegebenen Werte. Deshalb werden sie für die vom Arbeitsteam Fahrdynamik für die erforderlichen Fahrrinnenbreiten empfohlen.

Zu b) erforderlicher Sohlabstand

Die Ermittlung des erforderlichen Sohlabstandes war eine der wesentlichsten Aufgaben im Rahmen der fahrdynamischen Untersuchungen, da sich der erforderliche Sohlabstand direkt auf die potentiellen Abladetiefen und damit auf die Leistungsfähigkeit der Wasserstraße auswirkt.

Der Sohlabstand muss eingehalten werden, damit Grundberührungen ausgeschlossen werden können, die Beeinflussung der Sohle reduziert wird (Muldenbildung) und die Beschädigung der Antriebsorgane durch Ansaugen von Steinen gering gehalten wird.

In Modell- und Naturversuchen wurde der erforderliche Sohlabstand bestimmt. Die Größe wird stark von der Sohlbeschaffenheit beeinflusst, d.h. ob feinkörniges oder grobkörniges Sohlmaterial vorhanden ist. In den Versuchen galt es vor allem die Auswirkungen auf die Schifffahrt zu erforschen, wenn das natürlich vorhandene Sohlmaterial durch die Ausbaumaßnahme vergrößert wird, um die Sohle gegen Erosion zu stabilisieren.

Hierzu gibt es zwei prinzipielle Möglichkeiten:

1. Einbau eines Deckwerkes
2. Vergrößerung der Sohle durch Anreicherung mit Grobkorn

Beim **Deckwerkeinbau** wird ein Teppich aus Steinen mit Korndurchmessern von 70/200 mm eingebaut. Die Korngrößen sind so dimensioniert, dass die Sohle bei Hochwasser stabil bleibt.

Für die **Grobkornanreicherung** wird die Kornverteilung der natürlich vorhandenen Sohle nur moderat verändert, so dass der Erosionswiderstand zunimmt und die Geschiebefracht abnimmt. Eine ständige Geschiebezugabe ist jedoch notwendig.

Beim Deckwerk müssen aufgrund der Korndurchmesser und der damit verbundenen Schädigung der Schiffsantriebsorgane Steinschläge fast vollständig ausgeschlossen werden. Dementsprechend ist ein relativ großer Sohlabstand zu wählen. Es wurde ein **erforderlicher Sohlabstand für die Überfahrt von 0,8 – 0,9 m** ermittelt. In **Anfahr- und Wartebereichen** ist ein größerer Sohlabstand von ca. **1,3 – 1,4 m** einzuhalten.

Für die Grobkornanreicherung soll der heute von der Schifffahrt in Strecken mit Kieselsohle gewählte Sohlabstand möglichst nicht vergrößert werden. Das zulässige Größtkorn und die Kornverteilung sind daher so zu bestimmen, so dass die Schädigung an den Schiffsschrauben das gewöhnliche Maß an Verschleiß nicht übersteigt.

Für die **Kieselsohle und Grobkornanreicherung** kann deshalb das gleiche **Mindestflottwasser von 20 cm** angesetzt werden. Die 20 cm Mindestflottwasser basieren auf Erfahrungswerten und Empfehlungen der VBD, um den üblichen Verschleiß an den Antriebsorganen in Grenzen zu halten und um die Sicherheit und Leichtigkeit der Wasserstraße gewährleisten zu können. Sie werden durch die fahrdynamischen Modellrechnungen der BAW im Vergleich zu beobachteten Werten bestätigt. In **Felsstrecken** ist ein **Mindestflottwasser von 0,4 m** nötig, damit Grundberührungen ausgeschlossen werden können.

Zu c) Mindestschiffsgeschwindigkeiten

Für das sichere Navigieren dürfen die Ruderkräfte nicht zu gering werden. Da die Ruderkraft im Zusammenhang zur Schubkraft, erzeugt durch den Propeller, steht, ist das Manövrierverhalten der Schiffe u.a. abhängig von der Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser. Daraus folgt, dass für die Sicherheit gewisse Mindestschiffsgeschwindigkeiten bei normaler Überfahrt eingehalten werden müssen. Für die Strömungsgeschwindigkeiten an der Donau zwischen Straubing und Vilshofen ergibt sich daraus eine **nautisch erforderliche Mindestgeschwindigkeit von ca. 2 km/h über Grund**.

Zu d) Propulsionseigenschaften

Unter den Propulsionseigenschaften versteht man den Zusammenhang von aufgebrauchter Motorleistung und erreichter Schiffsgeschwindigkeit (siehe Abb. 4). Die aufzuwendende Leistung wächst schneller an als die erreichte Schiffsgeschwindigkeit. Diese Beziehung wird deutlich von den Fahrwasserbedingungen beeinflusst. Je enger das Fahrwasser, umso mehr Leistung wird benötigt um bestimmte Schiffsgeschwindigkeiten zu erreichen. Eine Gegenüberstellung der Fahrrinnenquerschnitte von Rhein und Donau zeigt die verschiedenen Fahrwasserbedingungen an beiden Flüssen (siehe Abb. 3). Für den Donauabschnitt wurden in Modellversuchen der VBD bekannte Engstellen aufgebaut, um die Propulsionseigenschaften für verschiedene Schiffstypen (GMS, Koppelverband, 4er-Schubverband 2er-Schubverband) in Abhängigkeit der Abladetiefe und Wasserführung (RNW, MW, HNN) zu untersuchen. Diese Ergebnisse und Auswertungen von Naturuntersuchungen wurden verwendet, um die Berechnungsgrundlagen der BAW zu überprüfen und darauf aufbauend Prognosen für Ausbauvarianten erstellen zu können.

Bei den Versuchen wurde besonders deutlich, **dass beim Ausbau der Wasserstraße nicht nur Fahrrinntiefen sondern auch das n-Verhältnis¹⁾ und somit auch die Fahrwasserbreiten zu beachten sind.** Dies gilt vor allem wenn auch breite Verbände (z.B. Koppelverband mit 22,8 m Breite) ausreichend gute Fahrwasserbedingungen vorfinden sollen. Bei engen Fahrwasserquerschnitten, bei denen nur hinsichtlich der Fahrrinntiefe optimiert wird, konnte z.T. der zusätzliche Fließtiefengewinn für diese Verbände nicht in Abladetiefe umgesetzt werden, da die Fahrzeuge mit der größeren Abladetiefe nicht mehr zu Berg fahren konnten.

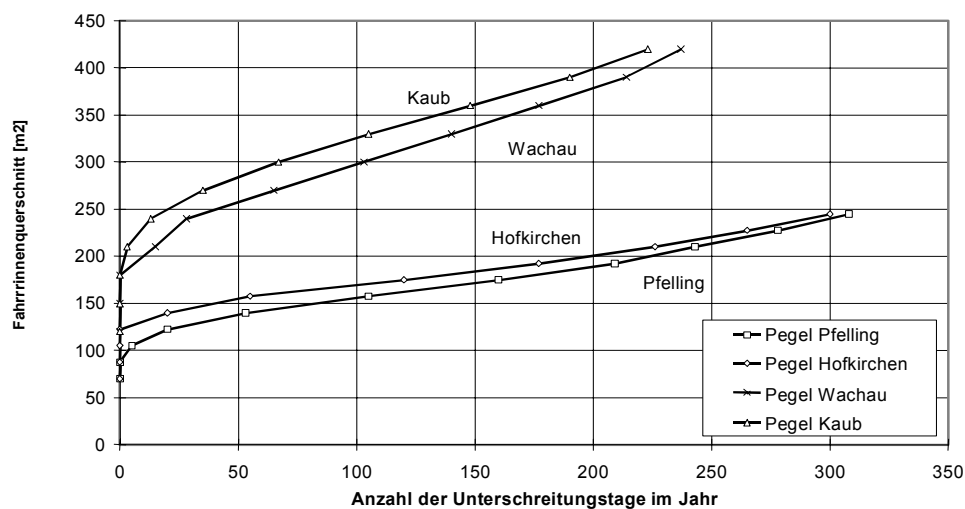


Abb. 3: Vergleich der Fahrrinnenquerschnitte im Rhein und der Donau

1) n-Verhältnis: Querschnitt des Flussschlauches dividiert durch die Fläche des eingetauchten Schiffsquerschnittes)

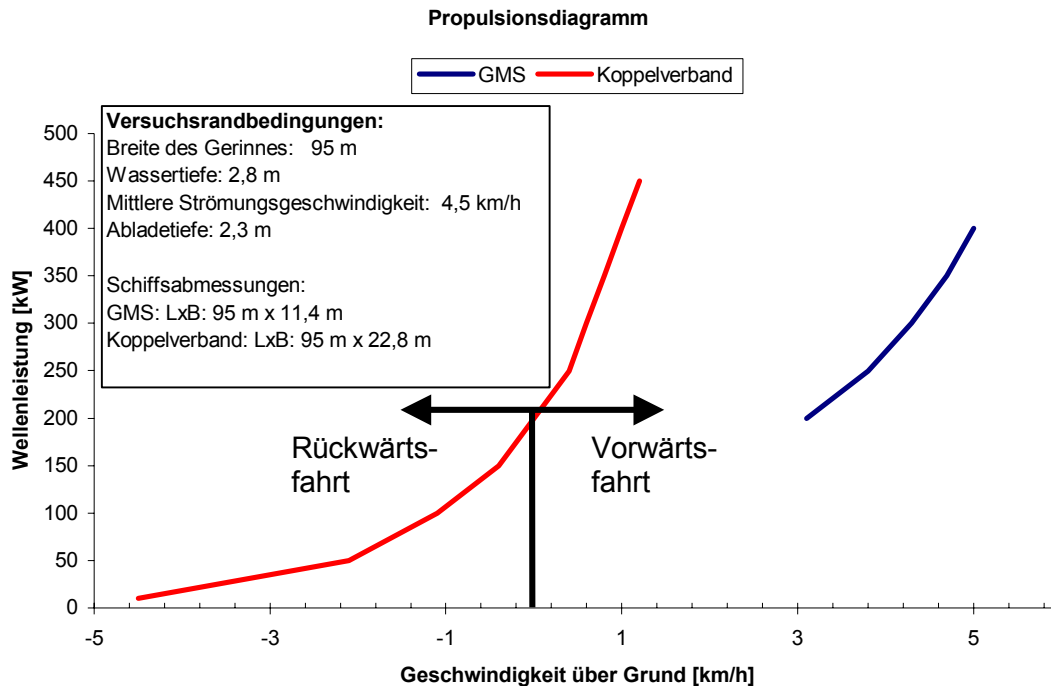


Abb.4: Propulsionsdiagramm zu Berg fahrender Schiffe (VBD Bericht 2019)

Zu e) Fahrdynamisches Einsinken

Das Schiff verdrängt beim Durchfahren des Wasserkörpers Wasser zur Seite und nach unten. Die dadurch lokal erhöhte Strömungsgeschwindigkeit im Bereich des Schiffskörpers reduziert aufgrund der Energieerhaltung – wegen der dort größeren kinetischen Energie – die potentielle Energie. Dies macht sich in einer Reduktion des Druckes und damit in einer Absenkung des Wasserspiegels bemerkbar. Das Schiff fährt in dieser „Absunkmulde“ und sinkt entsprechend tief gegenüber dem Ruhezustand ein. Das fahrdynamische Einsinken wirkt sich somit auch auf die erreichbaren Abladetiefen aus (siehe auch Abb. 1).

In der VBD wurden zum fahrdynamischen Einsinken (Bericht 2019) Modellversuche durchgeführt, die zeigten, dass das fahrdynamische Einsinken sehr stark von den Querschnitts- und Strömungsrandbedingungen abhängig ist. Maßgebende Größen sind hierbei die Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser und das n -Verhältnis. In Engstellen nimmt das Einsinken zu, kann jedoch durch langsamere Fahrt teilweise kompensiert werden. Es ist jedoch darauf zu achten, dass die Engstellen nicht zu lange sind, damit die durchschnittliche Schiffsgeschwindigkeit nicht zu gering wird, und dass in den Engstellen noch mit der nautisch erforderlichen Mindestgeschwindigkeit gefahren werden kann.

Ermittlung der Fahrwassertiefen und mittleren Strömungsgeschwindigkeiten mit numerischen 1-D Berechnungen

Eine wichtige Grundlage für die fahrdynamischen Berechnungen ist die Bestimmung der hydraulischen Randbedingungen wie Fließtiefen und mittleren Strömungsgeschwindigkeiten in den untersuchten Varianten. Die Querschnittsabmessungen werden aus den Planungsvarianten entnommen. Diese gehen dann in ein numerisches 1-D Modell ein, mit dem die Wasserspiegellagen und mittleren Strömungsgeschwindigkeiten in einem vorgegebenen Querschnittsabstand errechnet werden. Bei dem numerischen Modell wird der Flussquerschnitt in mehrere Streifen aufgeteilt und separat berechnet, wobei der Gesamtabfluss, gebildet aus der Summe der Teilabflüsse, konstant sein muss. Einbauten wie Buhnen und Leitwerke werden durch gesonderte Querschnittsbeziehungen erfasst. Die Berechnung der Wasserspiegellagen erfolgt mit einer Genauigkeit von ca. ± 5 cm (Siehe auch Abb. 5). Um eine Aussage der Wasserspiegellagen und mittleren Fließtiefen über das gesamte Abflussspektrum zu erhalten, werden die Berechnungen für verschiedene Abflusszustände durchgeführt (siehe Abb. 6) und daraus Dauerlinien erstellt. Diese Wasserstandsdauerlinien werden dann Grundlage für die fahrdynamischen Berechnungen.

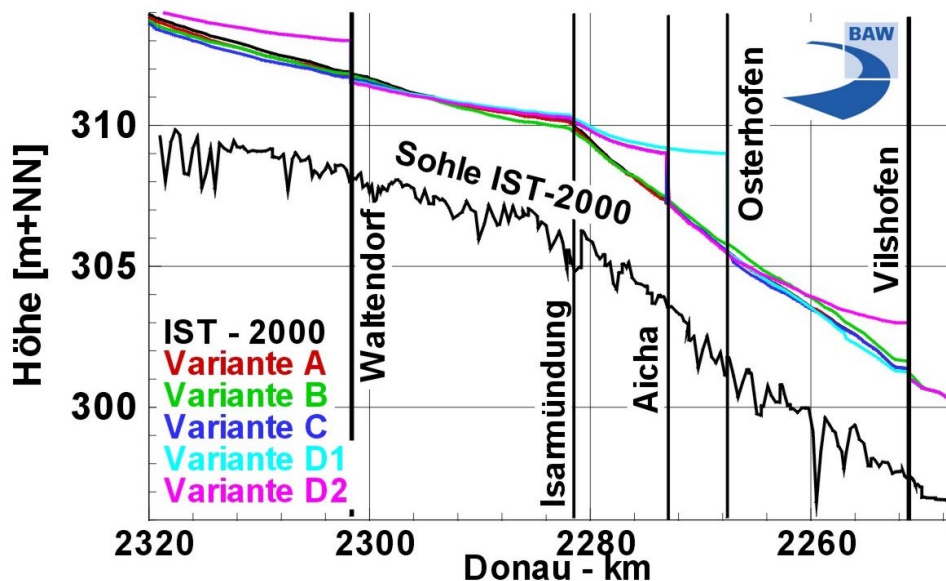


Abb. 5: Wasserspiegellagen bei $RN_{Q_{97}}$ für die Varianten (nach Berechnung BAW)

Abflusszustand	211/324* $RN_{Q_{97}}$	337/483	463/642 MQ_{97}	919/1204	1375/1765 $QHNN_{97}$
Ist-Zustand 2000	2,05	2,66	3,16	4,17	4,81
Variante A	2,25	2,93	3,42	4,17	4,81
Variante B	2,45	3,1	3,4		5,05
Variante C	2,49	3,06	3,42	4,17	4,81

*) Abfluss oberhalb und unterhalb der Isarmündung

Abb. 6: Kleinster Wert der mittleren Wassertiefen [m] (hydraulisch wirksam) im Bereich der Fahrrinne (nach Berechnungen der BAW)

Fahrdynamische Berechnungen zur Ermittlung der Abladedauerlinien für die Varianten A, B, C und dem Ist-Zustand 2000

Mit fahrdynamischen Berechnungen können die Einflüsse der geometrischen, hydraulischen und fahrdynamischen Randbedingungen auf die erreichbaren Schiffsgeschwindigkeiten und Abladetiefen erfasst werden. Die örtliche Gegebenheiten der untersuchten Flussstrecke werden durch die Betrachtung von Querprofilen in Abständen von 200 – 500 m berücksichtigt.

Die Schiffsgeschwindigkeit und der Absunk werden in einem Iterationsverfahren errechnet. Zunächst wird von der nautisch erforderlichen Mindestgeschwindigkeit von 2 km/h ausgegangen. Daraus ermittelt sich der Absunk und die mögliche Abladetiefe bei bekannter Strömungsgeschwindigkeit und Fließtiefe. Dies geschieht nun für alle ausgewählten Querschnitte entlang der Flussstrecke. Dabei werden die kleinsten errechneten Abladetiefen maßgebend für die gesamte Strecke. Mit dieser Abladetiefe werden die erreichbaren Schiffsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit des Absunks und unter Einhaltung des Mindestflottwassers / Sohlabstandes errechnet (siehe Abb.7 und 8). Eine anschließende Mittelwertbildung über die einzelnen Querschnitte ergibt dann die Durchschnittsgeschwindigkeit.

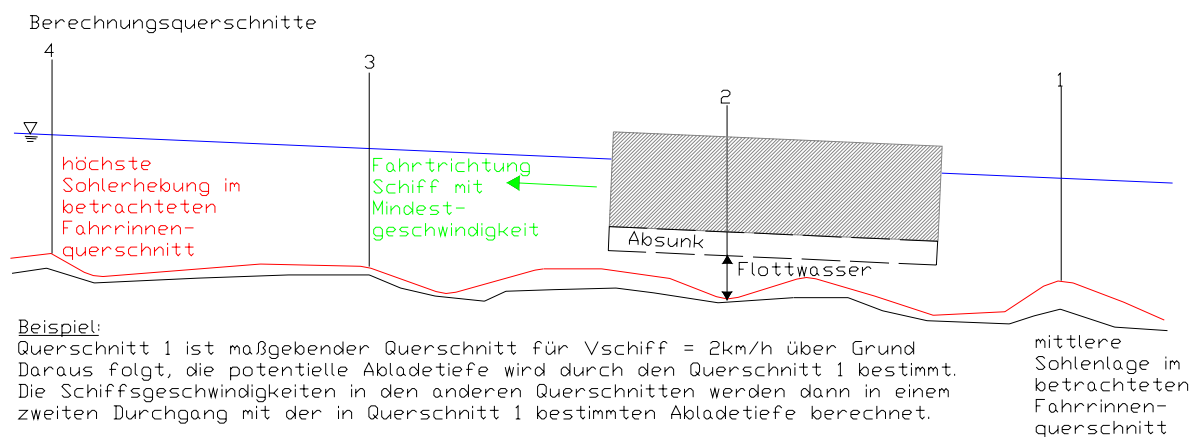


Abb.7: Berechnungsschritte entlang der Flussachse zur Bestimmung der potentiellen Abladetiefe und der Schiffsgeschwindigkeit

Die Berechnungen erfolgen dann für verschiedene Schiffstypen und Abflusszustände. Daraus lassen sich dann Dauerlinien für die potentiellen Abladetiefen erstellen. Aus den potentiellen Abladetiefen werden unter Berücksichtigung der hydrologischen und verkehrlichen Unsicherheiten mittlere Abladetiefen berechnet. Beobachtungen zeigen, dass insbesondere wegen der langen Transportstrecken an der Donau, die beobachteten Werte bei Niedrigwasser

um ca. 1 dm und bei MW um ca. 2 dm kleiner sind, als theoretisch möglich (siehe Abb. 9 und 10).

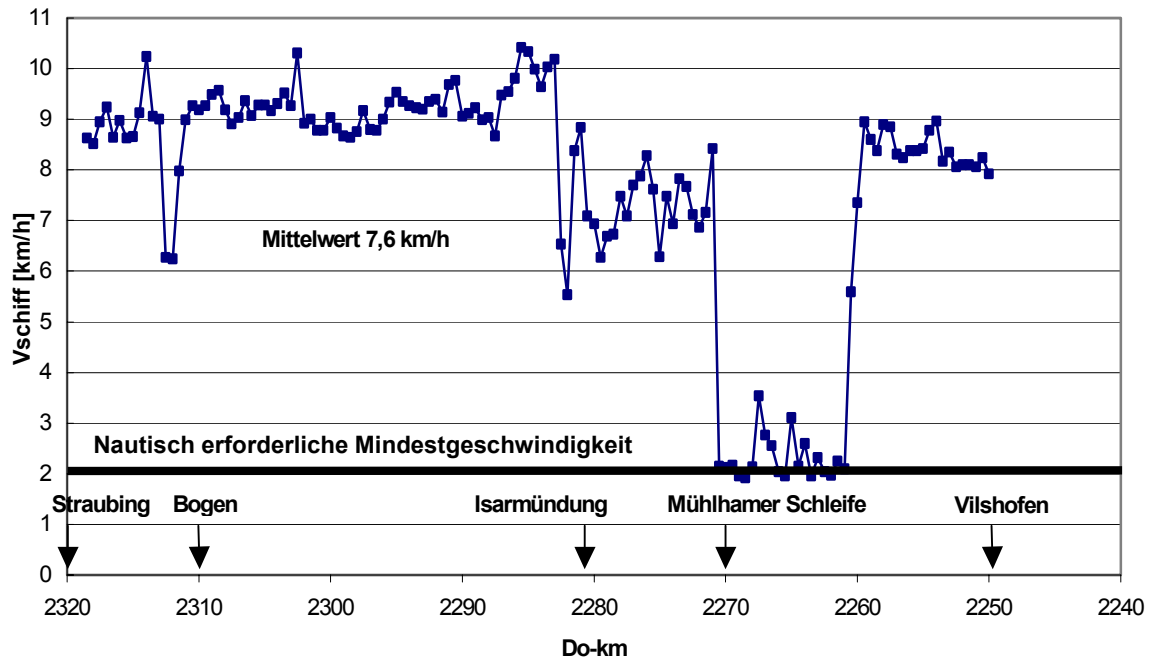


Abb. 8: Erreichbare Schiffsgeschwindigkeit über Grund für ein mittleres GMS (100m*11m) in der Bergfahrt für Variante B bei Niedrigwasser und einer potentiellen Abladetiefe von 1,75 m, Berechnungen nach VAO

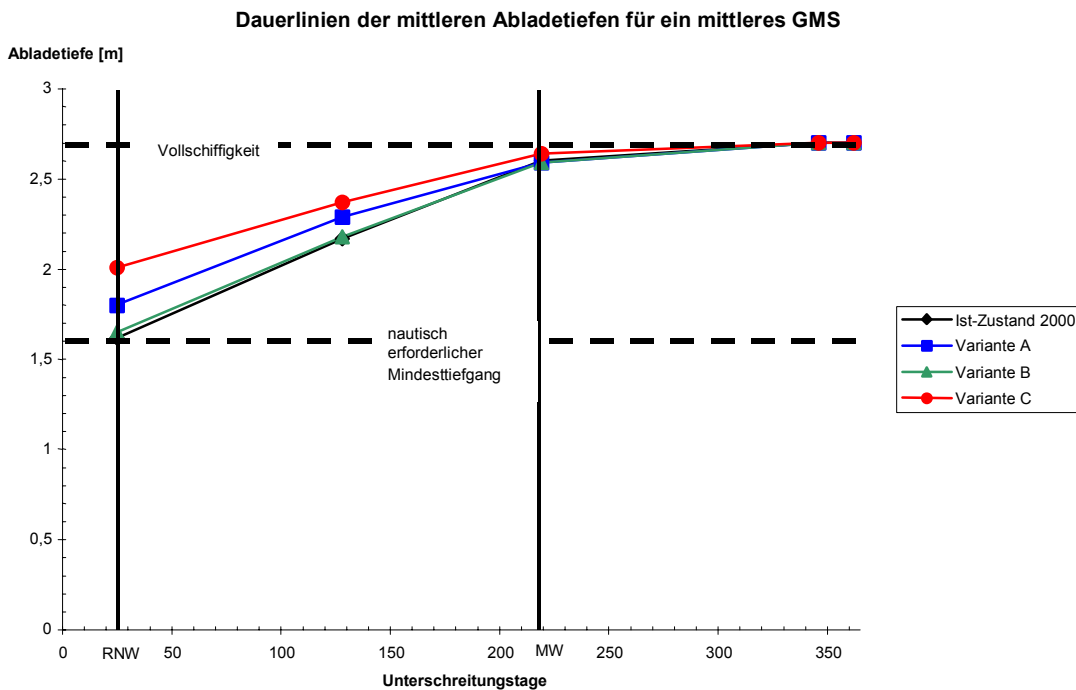


Abb. 9: Dauerlinien für die mittleren Abladetiefen eines mittleren GMS (LxB = 105 m x 10,5 m) (Ergebnisse der BAW Berechnungen)

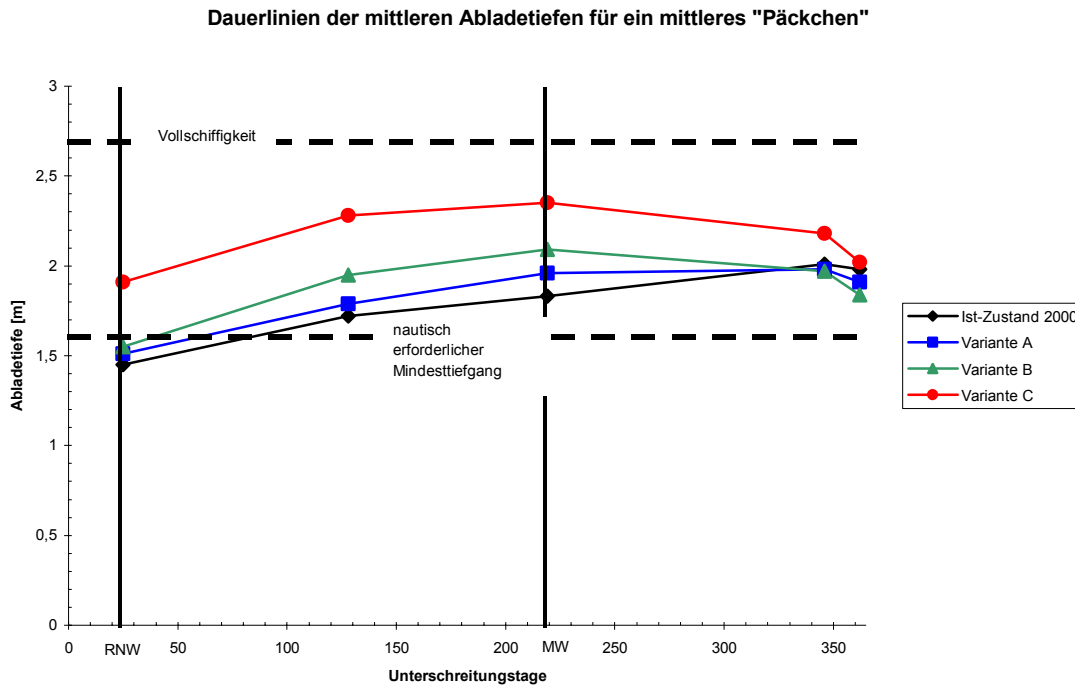


Abb. 10: Dauerlinien für die mittleren Abladetiefen eines mittleren Schubverbandes (LxB = 105 m x 22,8 m) (Ergebnisse der BAW Berechnungen)

Für die Varianten D (2-Stufen und 3-Stufen Lösungen) sind nahezu das ganze Jahr über Vollschiffigkeitsverhältnisse vorhanden. Vollschiffigkeit bedeutet, dass die Abladetiefe nicht durch die Strecke Straubing – Vilshofen, sondern durch die Abladebeschränkungen ober- bzw. unterhalb der Donaustrecke Straubing – Vilshofen nicht mit mehr als 2,7 m Tiefgang fahren können.