

## ERGEBNISSE DER VERKEHRSWASSERBAULICHEN UNTERSUCHUNGEN ZUM AUSBAU DER DONAU ZWISCHEN STRAUBING UND VILSHOFEN

**Bernhard Söhnngen, Hans-Heinrich Witte, Jürgen Kellermann, Anne Kampker**  
Bundesanstalt für Wasserbau, Kußmaulstraße 17, D-76187 Karlsruhe

**Zusammenfassung:** Im Rahmen der vertieften Untersuchungen zum Ausbau der deutschen Donau zwischen Straubing und Vilshofen wurden verkehrswasserbauliche Untersuchungen durchgeführt. Sie gliedern sich in variantenunabhängige und variantenabhängige Untersuchungen. Mit den variantenunabhängigen Untersuchungen wurden vor allem die Berechnungsannahmen und die Parameter bisheriger Untersuchungen überprüft, insbesondere hinsichtlich des Sohlstabilisierungskonzeptes und fahrdynamischer Bemessungsgrößen. Dabei zeigte sich u.a., dass bei einer Grobkornanreicherung ein größeres Mindestflottwasser erforderlich ist, damit die Schiffe nicht beschädigt werden, als bei einer feinkörnigeren Gewässersohle. Die Variantenanalyse deckt ein breites Spektrum denkbarer Ausbaumaßnahmen ab, beginnend vom Ist-Zustand 2000, dem Vergleichszustand aller weiteren Untersuchungen, über die Variante A, den „weiter optimierten Ist-Zustand“, die Variante B, die auch als „verschärfte Flussregelung“ bezeichnet wird und die Variante C, einer Einstufenvariante bis hin zu den Mehrstufenvarianten D. Unter der Voraussetzung, dass das Gewässerbett im Ausbauzustand einen Gleichgewichtszustand erreichen soll, der möglichst geringe Unterhaltungsaufwendungen erfordert, konnte mit Variante A bei Niedrigwasser eine Steigerung der Fahrrinntiefen um ca. 0,2 m gegenüber der Fahrrinntiefe des Ist-Zustandes 2000 bei  $RNW_{97}$  von 2,0 m erreicht werden. Im Jahresdurchschnitt führt dies zu einer Steigerung der durchschnittlichen Abladetiefe um ca. 0,1 m. Mit Variante C können bei Niedrigwasser ca. 0,4 m und im Jahresdurchschnitt ca. 0,2 m größere mittlere Abladetiefen erreicht werden. Mit den Varianten D kann der bisher in den ober- und unterstrom anschließenden Strecken erzielte Ausbaustandard, der nahezu ganzjährig eine Abladetiefe von ca. 2,7 m für einspurige Fahrzeuge ermöglicht, erreicht werden. Die für die volkswirtschaftliche Bewertung wichtigen durchschnittlichen Abladetiefen sind also bei allen Varianten unterschiedlich. Große Unterschiede weisen auch die wasserwirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen auf. Dies ist bei der Ausbauentcheidung zu beachten.

**Schlüsselworte:** Donauausbau, Flussregelung, Stauregelung, Variantenanalyse

## RESULTS OF THE WATERWAY ENGINEERING INVESTIGATIONS TO IMPROVE THE DANUBE RIVER BETWEEN STRAUBING AND VILSHOFEN

**Abstract:** Further investigations were carried out concerning the improvement of the navigable German part of the Danube river between Straubing and Vilshofen. They show that the dynamics of the ships' motion has to be taken into account in all variants with remaining river reaches, that are not dammed up by barrages. Besides accepted water level changes and fairway maintenance costs, especially the necessary minimum fairway widths and keel clearances restrict the extent of improvement by river training works. The considered variants included local improvements with conventional training and bed stabilisation methods (variant A), very strong training measures (B) and variants with one (C), two (D1) and three (D2) barrages. The water level changes for average low water reached from  $\pm 0,3\text{m}$  (A,B) to locally 4,6 m (D1). The improvements in annual average draught are between 0,1 m for variant A, 0,2 m for C and more than 0,4 m for D. Therefore the economic effects of the above mentioned variants is very different, and also the impact on the ecological system. This has to be considered for the decision concerning the extent of improvement of the Danube River.

**Keywords:** Danube improvement, river engineering, analysis of variants

## 1. Veranlassung

Mit den vertieften Untersuchungen zum Ausbau der Donau zwischen Straubing und Vilshofen, der letzten noch nicht durch Staustufen ausgebauten Teilstrecke der deutschen Wasserstraße Donau, sollte eine Richtungsentscheidung über Methode und Umfang des Ausbaus vorbereitet werden. Hierzu wurden solche Ausbauvarianten untersucht, mit denen die zum Teil konkurrierenden Belange

- des Naturschutzes (erfordert möglichst geringe Wasserstandänderungen gegenüber dem Ist-Zustand, insbesondere in den Auwäldern und eine möglichst hohe Morphodynamik),
  - des Hochwasserschutzes (erfordert möglichst geringe Wasserstandsanhörungen bei Hochwasser und möglichst kein Aufsteilen der Hochwasserwellen),
  - der Schifffahrt (erfordert möglichst große Fahrrinntiefen und -breiten) und
  - der Ökonomie (erfordert einen möglichst großen schifffahrtlichen Nutzen, der den größten Anteil des Ausbaunutzens ausmacht, bei möglichst geringen Ausbaukosten)
- in unterschiedlicher Wichtung berücksichtigt wurden. Art, Umfang und Tiefe der 1996 begonnenen und im Jahre 2002 abgeschlossenen Untersuchungen orientierten sich dabei an der oben definierten Zielsetzung. Die Untersuchungen haben somit Durchführbarkeitsniveau, kein Ausführungsniveau.

Die hier beschriebenen Aufgaben der Bundesanstalt für Wasserbau, einer Oberbehörde des deutschen Bundesverkehrsministeriums, reichten dabei von Grundsatzuntersuchungen zur hydraulischen und flussmorphologischen Wirkung von Regelungsmaßnahmen, über die fahrdynamische und wasserbauliche Analyse von Planungsvarianten bis zur Einbringung von verkehrswasserbaulicher Kompetenz in fachbezogene Arbeitsteams, in denen die Untersuchungen fachwissenschaftlich vorbereitet und begleitet wurden.

Die Untersuchungen gliedern sich in variantenunabhängige Natur- und Modelluntersuchungen und in variantenabhängige Modelluntersuchungen.

Mit den variantenunabhängigen Untersuchungen wurden die Berechnungsannahmen und Parameter bisheriger Untersuchungen überprüft, die Grundlagen für die Entwicklung der Regelungs- und Sohlsicherungskonzepte erarbeitet und belastbare Basisdaten z.B. für die wasserwirtschaftliche ökologische Bewertung erarbeitet. Ein Schwerpunkt der Untersuchungen war die Fahrdynamik, u.a. hinsichtlich der erforderlichen Sohlabstände bei einer grobkörnigen Sohle und der Fahrrinnenbreiten für Begegnungsverkehr in Geraden und für den Richtungsverkehr in Kurven.

Die variantenabhängigen Untersuchungen erfolgten

- mit detaillierten, 1D-Strömungs-, Feststofftransport- und Befahrbarkeitsmodellen,
- mit einem physikalischen Modell des Isarmündungsgebietes und
- mit einem aerodynamischen Modell für die Reibersdorfer Kurven (TU Karlsruhe).

Grundlagen der Variantenanalyse waren die Variantenbeschreibungen, die in Fachgremien entwickelt wurden. Vergleichszustand für alle Varianten ist der im Jahre 2000 hinsichtlich der Fahrrinntiefen erreichte Gewässerzustand, bei dem eine Solltiefe von 2,0 m unter  $RNW_{97}$  (wird an 22 Tagen pro Jahr unterschritten) unterhalten wird (Ist-Zustand 2000).

Nachfolgend wird über die wichtigsten Ergebnisse der v.g. Untersuchungen berichtet, die, selbst wenn sie für einen speziellen Untersuchungsraum erzielt wurden, dennoch eine gewisse Verallgemeinerung erlauben.

## 2. Variantenunabhängige Untersuchungen

### 2.1 Analyse des Ist-Zustandes

Die Donau im Projektgebiet zwischen Straubing und Vilshofen ist durch höhere Strömungsgeschwindigkeiten und deutlich kleinere Abfluss- und Fahrinnenquerschnitte gekennzeichnet als die angrenzenden Wasserstraßen, siehe auch Abb. 1. Dabei hat die Donau zusätzlich deutlich variable Abflüsse als z. B. der Rhein. Schließlich weist die Donau im Projektgebiet auch eine große Mobilität der Flusssohle mit ausgeprägten und in stetiger Veränderung befindlichen Kiesbänken, Krümmungskolken und Mittelgründen auf. Dies erschwert die Unterhaltung der Fahrrinne, reduziert die Verlässlichkeit der Fahrwasserverhältnisse für die gewerbliche Schifffahrt und erhöht das Unfallrisiko.

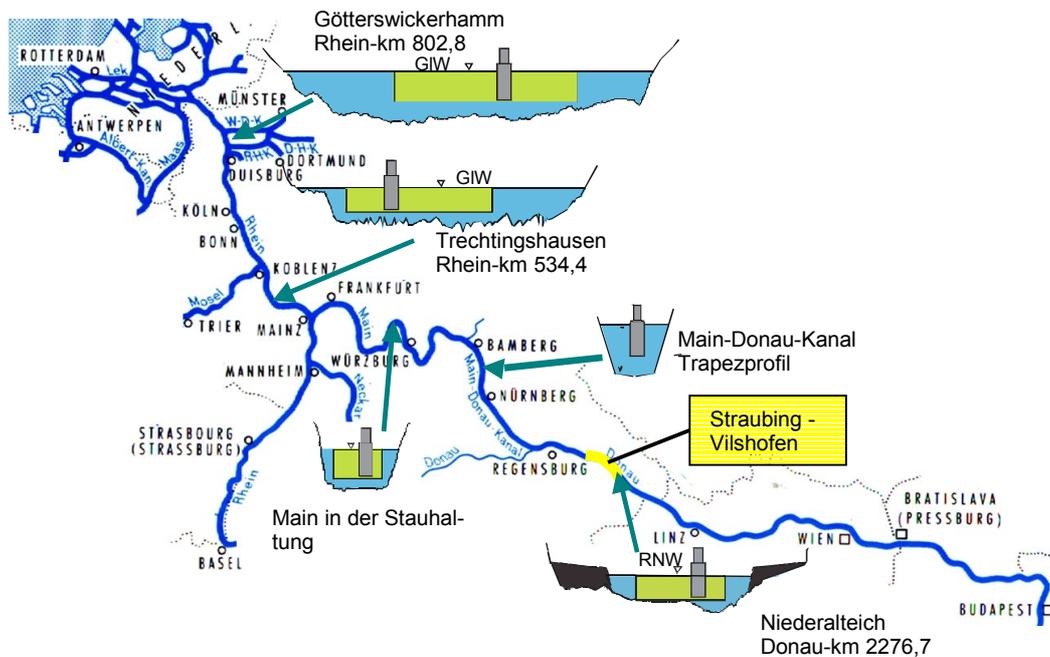


Abb. 1: Querschnittsverhältnisse der Rhein-Main-Donau-Wasserstraßen-Verbindung.

Diese Fahrwasserverhältnisse führen in der freifließenden Donau zwischen Straubing und Vilshofen dazu, dass das fahrdynamische Einsinken der Schiffe in Fahrt (vgl. Abb. 2) und der Verkehrsflächenbedarf größer sind als in größeren Flüssen (Rhein, Donau unterhalb Linz), in solchen mit geringeren Gefällen (Main, staugeregelte Strecke der Donau) oder in Stillgewässern und Kanälen (Main-Donau-Kanal). Auch kann nur mit deutlich geringeren Schiffsgeschwindigkeiten gefahren werden, die das Navigieren erschweren und größere horizontale Sicherheitsabstände, z.B. zu Buhnen, erfordern.

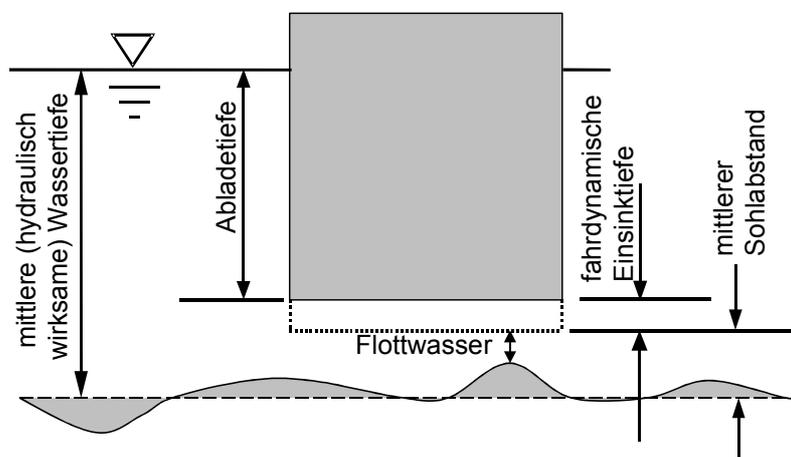


Abb. 2: Definition von Tiefenangaben zur Fahrdynamik von Binnenschiffen

Über die oben erwähnte morphologische Dynamik hinaus, weist die Sohle der Donau im Projektgebiet Bereiche mit grobem Korn und Fels auf. Grundberührungen und das Ansaugen von Sohlmaterial in die Schiffspropeller können dort Schäden insbesondere an den Antriebs- und Steuerorganen des Schiffes bewirken. Um derartige Schäden zu vermeiden, wählen die Schiffsführer ein größeres Flottwasser (zur Definition siehe Abb. 2) als in Gewässern mit sandiger oder kiesiger Sohle. In den für die Abladetiefen maßgebenden Furten hat die Donau überdies eine nahezu ebene Sohle. Es gibt dort keine signifikanten Übertiefen, wie z.B. in der Gebirgstrecke des Rheins, die von der Schifffahrt genutzt werden könnten.

Aus dem Vorstehenden folgt, dass die in der freifließenden Donau aus hydraulischen, flussmorphologischen und unterhaltungstechnischen Gründen erreichbaren kleinen Fahrrinnenquerschnitte zusätzlich nautisch in geringerem Umfang ausgenutzt werden können als z.B. in einem staugeregelten Fluss oder in einem solchen mit wesentlich größeren Querschnitten oder/und mit gleichmäßigerer Wasserführung. Deshalb ist die von der Schifffahrt gewählte Abladetiefe im Kurzstreckenverkehr um ca. 0,3 m und auf den donautypischen langen Relationen, z.B. vom Niederrheingebiet den Rhein aufwärts, über den Main, den Main-Donau-Kanal und die freifließende Donau nach Linz in Österreich, um 0,4 m kleiner als die Fahrrinntiefe. Sowohl mehrspurige als auch schwächer motorisierte Fahrzeuge müssen z.T. mit noch geringeren Tiefgängen fahren, da die ansonsten erreichbaren Schiffsgeschwindigkeiten es nicht mehr erlauben würden, Engstellen sicher zu passieren.

Die Analyse der heute vorhandenen fahrdynamischen Engstellen war somit ein wesentliches Ziel der variantenunabhängigen Untersuchungen. Hierzu wurden mit fahrdynamischen Berechnungsverfahren bei Vorgabe der Mindestschiffsgeschwindigkeit die erreichbaren Abladetiefen errechnet. Es zeigte sich, dass insbesondere zweispurige Fahrzeuge, z.B. die donautypischen Koppelverbände, große Schwierigkeiten haben, z.B. die schwierige Steilstrecke zwischen der Isarmündung und Aicha zu überwinden, siehe Abb. 3 (fahrdynamische Ergebnisse für Mittelwasser) und Abb. 4 (Lageplan).

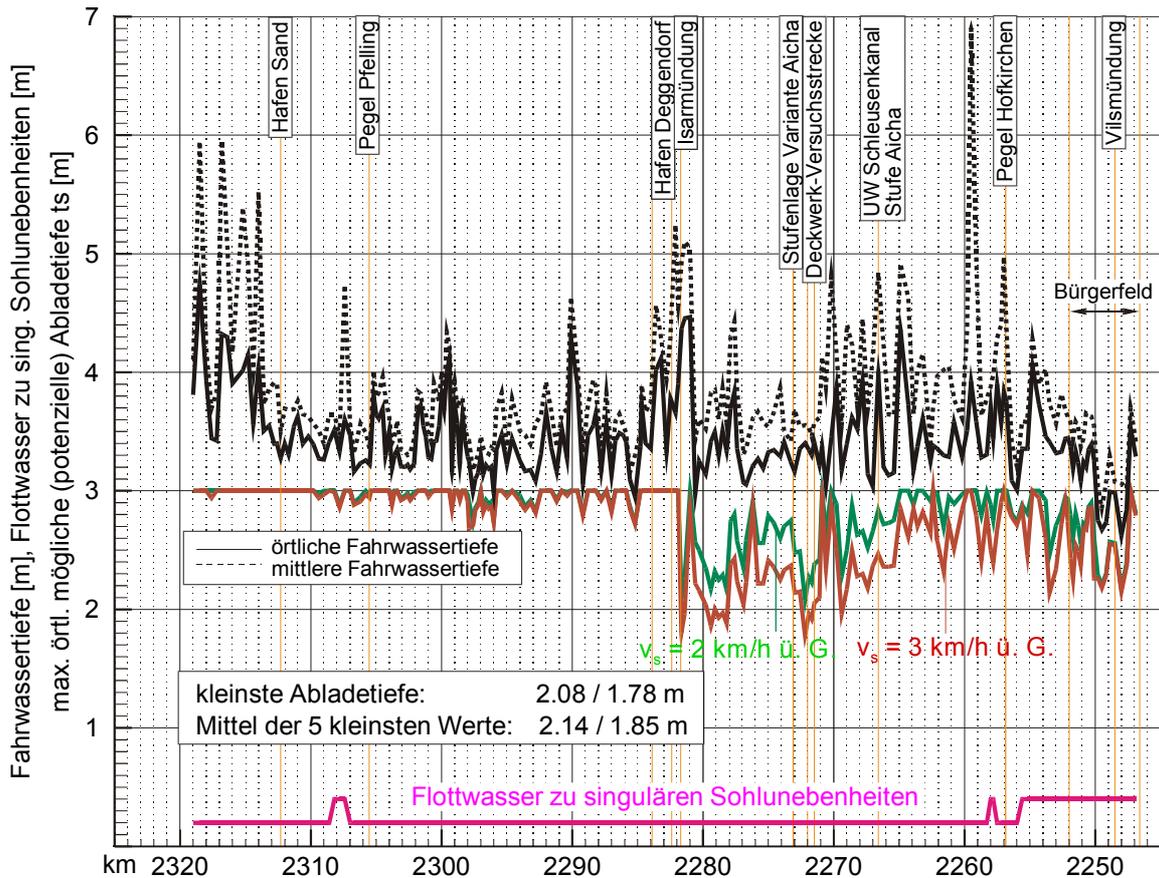


Abb. 3: Längsschnitt der errechneten potenziellen Abladetiefen zweispuriger, durchschnittlich motorisierter Fahrzeuge im Gewässerzustand der Planung von 1998 vor Ausbau des Bürgerfeldes bei MQ<sub>97</sub>

In dieser Teilstrecke ist auch der Anstieg der Wasserspiegellagen zwischen Niedrig- und Mittelwasser geringer als in den übrigen Streckenabschnitten. Im Grunde wäre es deshalb angezeigt, in dieser Teilstrecke, auch schon im Ist-Zustand 2000, größere Fahrrinntiefen vorzuhalten als in den übrigen Streckenabschnitten, um Gleichwertigkeit zu den angrenzenden Streckenabschnitten zu erreichen. Die Möglichkeiten und Grenzen der flussregelnder Maßnahmen, zusammen mit einer intensiveren Unterhaltung, sind aber in diesem Streckenabschnitt schon weitgehend ausgeschöpft. Jede weitere, d.h. verschärfte Regelung, führt insbesondere dort zu weiter vergrößerten Strömungsgeschwindigkeiten, neben dem Anstieg des Wasserstandes und durch größere



Wichtig war deshalb auch, zu ermitteln, welche Mindestbreiten der Fahrrinne erforderlich sind, damit der Schiffsverkehr auch künftig bewältigt werden kann. Hierzu wurden Modelluntersuchungen an der Versuchsanstalt Oberrach der TU München durchgeführt. Diese bestätigten zunächst, dass die heute vorhandenen Fahrrinnenbreiten (von im Mittel ca. 70 m) in der Regel nur den Richtungsverkehr, insbesondere in Kurven, und nur an wenigen Stellen den Begegnungsverkehr der heute zugelassenen Fahrzeuge erlauben. Bei der Passage der Strecke Straubing – Vilshofen müssen die Schiffsführer somit Wartezeiten vor Engstellen in Kauf nehmen. Eine Untersuchung des ökonomischen Gutachters auf der Basis der Begegnungsmöglichkeiten, die als Ergebnis der fahrdynamischen Modelluntersuchungen ermittelt wurden, zeigte zwar, dass es auch bei künftig weiter zunehmendem Verkehrsaufkommen nicht zu einem Verkehrskollaps kommen wird, dass die dazugehörigen Wartezeiten aber stark ansteigen werden. Eine denkbare Einschränkung der Fahrrinnenbreiten gegenüber denen im Ist-Zustand ist somit unter weiterer Beachtung der Sicherheit des Schiffsverkehrs nicht zu empfehlen. Diese Bedingung begrenzte, neben der Forderung nach möglichst geringen Wasserstandsänderungen und einem begrenzten Unterhaltungsaufwand, die erreichbaren nutzbaren Fahrrinntiefen insbesondere bei Variante A.

Deshalb wurde nach Alternativen zur Vergrößerung der Fahrrinntiefe bei unveränderten Breiten gesucht. Eine solche Möglichkeit ist eine noch intensivere Unterhaltung als im Ist-Zustand. Die Analyse der zugehörigen Fahrrinnenbaggermengen, vor allem hinsichtlich des Anstiegs mit der Fahrrinntiefe, zeigt aber, dass mit jedem Dezimeter größerer Fahrrinntiefe die Unterhaltungsbaggermengen nahezu verdoppelt würden. Aber schon heute liegt der Umfang der Unterhaltungsaufwendungen von insgesamt ca. 70.000 m<sup>3</sup>/a an der Wirtschaftlichkeitsgrenze, vor allem deshalb, weil die Unterhaltungsbaggerungen ein technisches und logistisches Problem darstellen, da die Anlandungen nicht immer an den gleichen Stellen auftreten und über die gesamte Strecke verteilt sind. Die aus ökologischen und wasserwirtschaftlichen Gründen angestrebte Beibehaltung der natürlichen Flussdynamik lässt somit aus Gründen der Begrenzung der Unterhaltungsaufwendungen keine signifikant größeren Fahrrinntiefen als ca. 2,0 m, das heute angestrebte Maß, zu.

Da die Unterhaltungsaufwendungen in erster Näherung proportional zum Geschiebetransportvermögen sind, wäre es im Grundsatz auch möglich, die Baggermengen zu reduzieren, wenn Maßnahmen ergriffen würden, die auf eine grobkörnigere Sohle mit geringerem Geschiebetransportvermögen hinwirken, z. B. eine Grobkornanreicherung. Dadurch wäre es alternativ auch möglich, eine größere Fahrrinntiefe bei gleichbleibendem Unterhaltungsaufwand zu erreichen. Neben der starken Einschränkung der Morphodynamik durch solche Maßnahmen wäre aber ein weiterer negativer Effekt zu beachten, dass nämlich die Schiffsführer ein größeres Mindestflottwasser wählen müssten, um Schäden am Schiff, insbesondere an den Schiffspropellern, durch angesaugte Grobkomponenten, zu vermeiden. Nur dann, wenn Korngrößen mit mehr als ca. 50 mm Durchmesser vermieden werden können und wenn  $d_{50}$  nicht mehr als ca. 25 mm beträgt, kann aus Untersuchungen zur Schädigung von Schiffsschrauben durch Steinschläge davon ausgegangen werden, dass das Mindestflottwasser (etwa mit 0,2 m bei einer Kiessohle) bei einer grobkörnigeren Sohle nicht ansteigen würde, s.a. Kap. 2.2 und Abb. 8. In der Teilstrecke oberhalb der Isarmündung, die eine deutlich feinkörnigere Sohle aufweist, wäre somit unter Inkaufnahme einer stark reduzierten Morphodynamik noch ein gewisses Potenzial vorhanden. Unterhalb der Isarmündung sind die vorgenannten Grenzbedingungen für die Sohlkörnung schon heute weitgehend erreicht, siehe Abb. 5. Da diese Strecke zumeist auch abladebestimmend ist, sind somit die Möglichkeiten und Grenzen einer Grobkornanreicherung aus fahrdynamischen Gründen stark eingeschränkt. Der mögliche Tiefengewinn durch eine Grobkornanreicherung wurde deshalb im Rahmen der vertieften Untersuchungen nicht weiter verfolgt, zumal er bei allen Varianten, bei denen freifließende Strecken verbleiben (Ist-Zustand 2000, A und C)

nahezu gleichsinnig aufträte und sich deshalb im relativen Variantenvergleich aufheben würde.

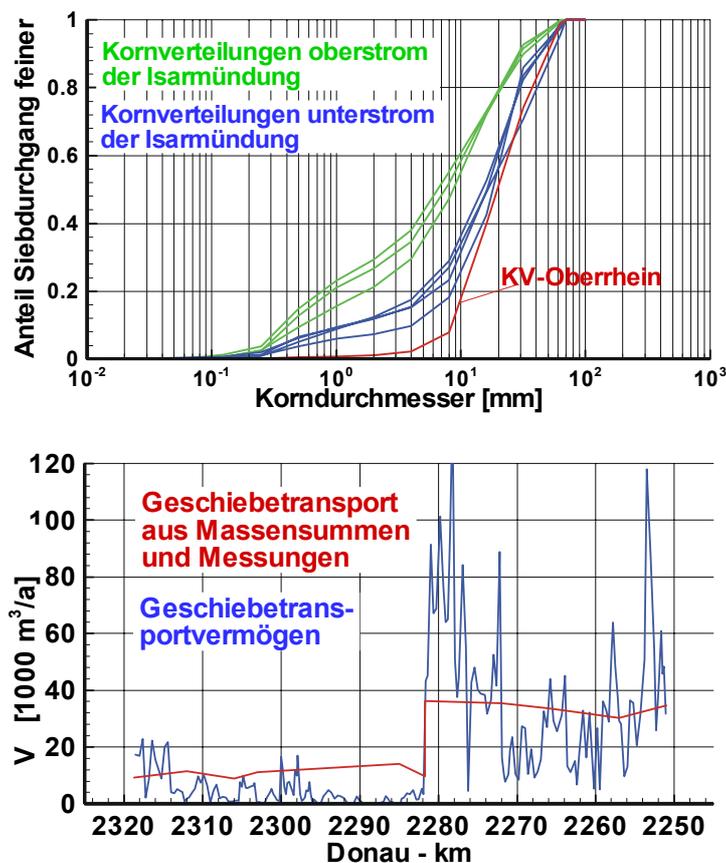
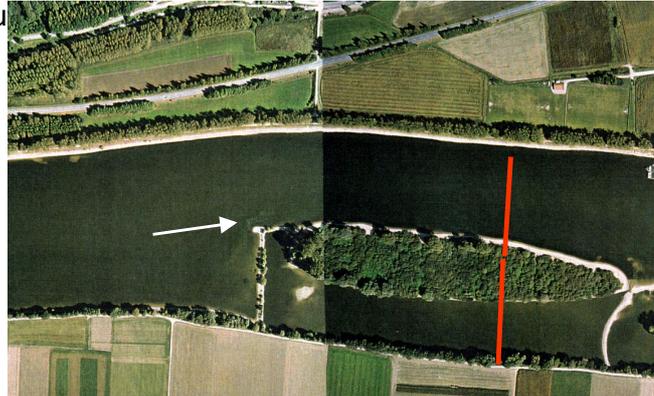


Abb. 5: Kornverteilung (oben) der Donausedimente (Sohlendeckschicht) und Jahresgeschiebe Frachten (unten).

Die Analyse der Sohlensedimente der Donau im Projektgebiet, des Geschiebetransportes und der Unterhaltungsaufwendungen zeigt im übrigen auch, dass die Gewässersohle der Donau im Ist-Zustand und für Ausbauzustände mit Ausnahme der Stauräume langfristig nur durch Maßnahmen der Geschiebebewirtschaftung aufrechterhalten werden kann, wenn nicht signifikante Änderungen der Sohlkornverteilungen, der Gewässermorphologie und der Wasserspiegellagen hingenommen werden. Hierzu gehört die Zugabe von Geschiebe im Unterwasser der Stufe Straubing und in der Unteren Isar, da die oberstrom anschließenden Teilstrecken staugeregelt sind und deshalb die dort vorhandenen Sedimente weitgehend zurückgehalten werden. Da der Geschiebetransportlängsschnitt der Donau zusätzlich stark ungleichförmig ist, müssen die im Rahmen der Unterhaltung entnommenen Sohlensedimente an anderer Stelle wieder zugegeben werden. Schließlich gehört den zu Maßnahmen der Geschiebebewirtschaftung auch die gezielte Entnahme von Geschiebe, insbesondere am unterstromseitigen Rand der Ausbaustrecke, d. h. an der Stauwurzel zu nächsten Haltung der Stufe bei Kachlet bei Vilshofen, an der sich das Geschiebe ablagert. Langfristig sind für den Ist-Zustand 2000 ca. 15.000 m<sup>3</sup> pro anno bei Straubing und ca. 35.000 bis 40.000 m<sup>3</sup> pro anno in der Unteren Isar bzw. an der Isarmündung zuzugeben. Für diese Abschätzung wurde angenommen, dass die Korngrößen des Ist-Zustandes unverändert bleiben sollen, siehe Abb. 5. Im Ausbauzustand der Variante A sind die gleichen Mengen, bei Variante C langfristig ca. 80 % davon zuzugeben.

## 2.2 Verbesserungen der Modelltechnik

Zur Durchführung der vergleichenden Variantenanalyse wurden neben einem physikalischen Modell des Isarmündungsbereiches detaillierte, eindimensionale Modelle verwendet. Diese Modelltechnik wurde ausgewählt, um in vertretbarer Zeit eine große Anzahl von Ausbauvarianten nebst Untervarianten untersuchen und optimieren zu können. Zur Kalibrierung dieser Modelle wurden ergänzende Naturuntersuchungen durchgeführt, unter anderem im Hinblick auf die Aufteilung des Abflusses zwischen Hauptgerinne und Altarm und der zugehörigen Modellparameter, im Beispiel auf Abb. 6 des Überfallbeiwertes des Queranschlusses kontrolliert.



Messquerschnitt km 2286,5; 1924 m<sup>3</sup>/s

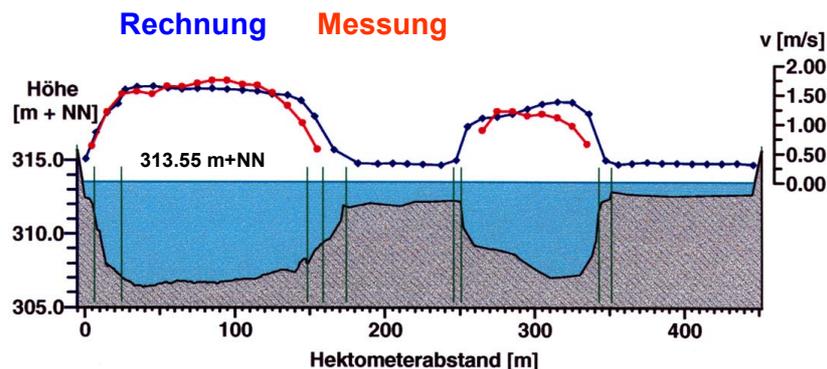


Abb. 6: Vergleich gemessener und berechneter Fließgeschwindigkeitsverteilungen

Die Abb. 6 zeigt, dass auch die Verteilung der Fließgeschwindigkeiten über das Querprofil mit der 1D-Modelltechnik in guter Näherung ermittelt werden konnte. Im dargestellten Beispiel wurde der Donaustrom dazu rechentechnisch in 2 Teilstränge aufgeteilt, den Hauptstrom und den Bereich hinter der Insel. Die Verteilung der Fließgeschwindigkeiten innerhalb der jeweiligen Teilquerschnitte wurde über die Annahme eines konstanten hydraulischen Gefälles aus der Rauheits- und der Wassertiefenverteilung errechnet.

Weiterhin wurden Geschiebetransportmessungen durchgeführt, wobei gleichzeitig Sohlproben erhoben und Längspeilungen durchgeführt wurden, um festzustellen, ob Transportkörper vorliegen. Die auf dieser Basis kalibrierten Geschiebetransportformeln wurden zur Errechnung des Feststofftransportvermögens im Ist-Zustand und für Ausbausituationen verwendet. Sie basieren auf der Meyer-Peter-Gleichung unter Berücksichtigung des ripple-Faktors, der unter Beachtung von Kiesdünen und der Kornrauheit ermittelt wurde.

Zur Kalibrierung der fahrdynamischen Modelle, mit denen das Einsinken der Schiffe in Fahrt und daraus der mögliche Schiffstiefgang bei vorhandenen Tiefenverhältnissen ermittelt werden konnte, wurden Modelluntersuchungen an der Versuchsanstalt für Binnenschiffsbau in Duisburg (VBD) durchgeführt, wobei die Gefälle-, Strömungs-, Tiefen-

und Breitenverhältnisse der Donau durch äquivalente Rechteckquerprofile approximiert wurden. Weiterhin wurden Naturuntersuchungen, z.B. zu den erreichbaren Schiffsgeschwindigkeiten durchgeführt und mit Berechnungen verglichen. Diese basieren wie die Strömungsberechnungen auf den eindimensionalen Bewegungsgleichungen, hier unter Berücksichtigung der Rückströmung, die vom Schiff ausgelöst wird, dem Schiffswiderstand, der Propellertheorie und semiempirischen Ansätze zum Einfluss der schiffserzeugten Wellen. Auf Abbildung 7 ist gezeigt, dass mit diesen Modellverfahren z.B. das fahrdynamische Einsinken (Squat) bei vorgegebener Schiffsgeschwindigkeit und die erforderliche Motorleistung mit ausreichender Genauigkeit prognostiziert werden können. Die Modellverfahren waren somit in der Lage, z.B. Längsschnitte der Grenzabladetiefen zu ermitteln, wie z. B. auf Abb. 3. Hieraus ergaben sich Hinweise auf die weitere Optimierung von Regelungsmaßnahmen mit dem Ziel, möglichst gleichwertige Schifffahrtsverhältnisse auf der gesamten Strecke zu erreichen.

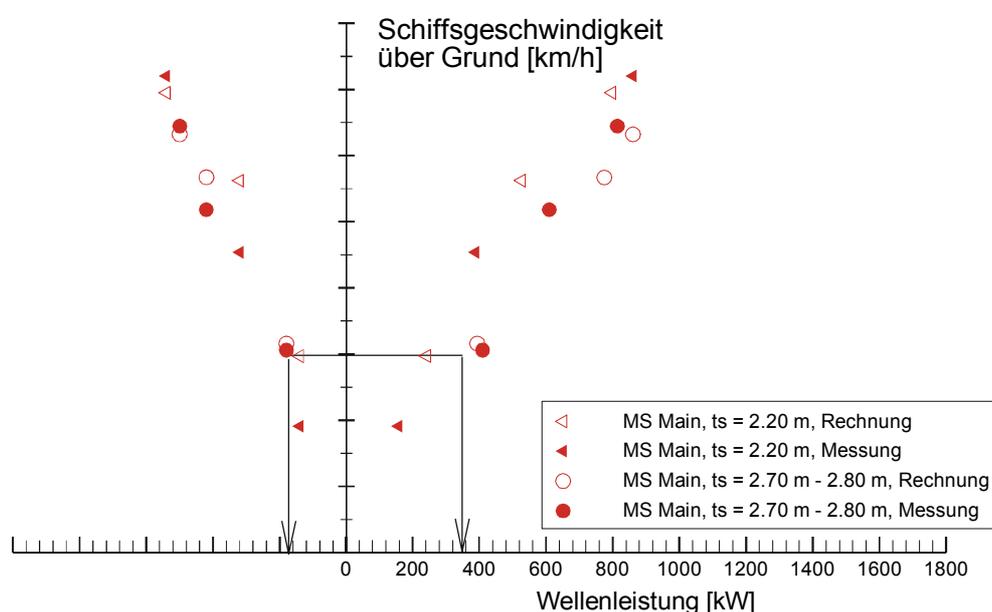


Abb. 7: Vergleich gemessener und berechneter fahrdynamischer Kennwerte für die Bergfahrt des MS Main im Bereich der Deckwerkversuchstrecke bei Aicha.

Für diese Modellrechnungen waren realistische Annahmen, z.B. zur Mindestschiffsgeschwindigkeit unter Engpassbedingungen erforderlich, da diese Annahmen u.a. die errechneten Grenzabladetiefen skalieren. Je größer die erforderliche Mindestschiffsgeschwindigkeit ist, desto größer ist nämlich das fahrdynamische Einsinken und desto geringer ist die mögliche Abladetiefe. Die Modelluntersuchungen in der VBD ergaben diesbezüglich, dass für die Verhältnisse an der Donau eine Mindestschiffsgeschwindigkeit durchs Wasser von ca. 7 km/h erforderlich ist, damit die Schiffe noch Ausweichmanöver fahren können. Über Grund ergibt dies an den ungünstigsten Stellen im Ist-Zustand eine Mindestschiffsgeschwindigkeit von ca. 2 km/h in der Bergfahrt. Da dies ein äußerst geringer Wert ist, der in der Praxis in der Regel überschritten wird, sind alle für die vergleichende Betrachtung ermittelten Werte für die möglichen Abladetiefen obere Grenzwerte.

Entsprechend wurden für das Mindestflottwasser untere Grenzwerte gewählt. Genannt wurde schon der Wert von 0,2 m, der sich aus dem Vergleich errechneter und gemessener Abladetiefen unter Grenzbedingungen in Strecken mit Kiessohle ergab. In Felsstrecken ist dagegen ein Wert von 0,4 m anzusetzen. Noch größer ist das Mindestflottwasser bzw. der Abstand zwischen Schiffsboden und mittlerer Sohlhöhe

(Sohlabstand) im Bereich einer äußerst grobkörnigen Sohle, z.B. bei einem Sohldeckwerk, wenn angesaugte Steine zu starken Propellerschäden führen, siehe Abb. 8.

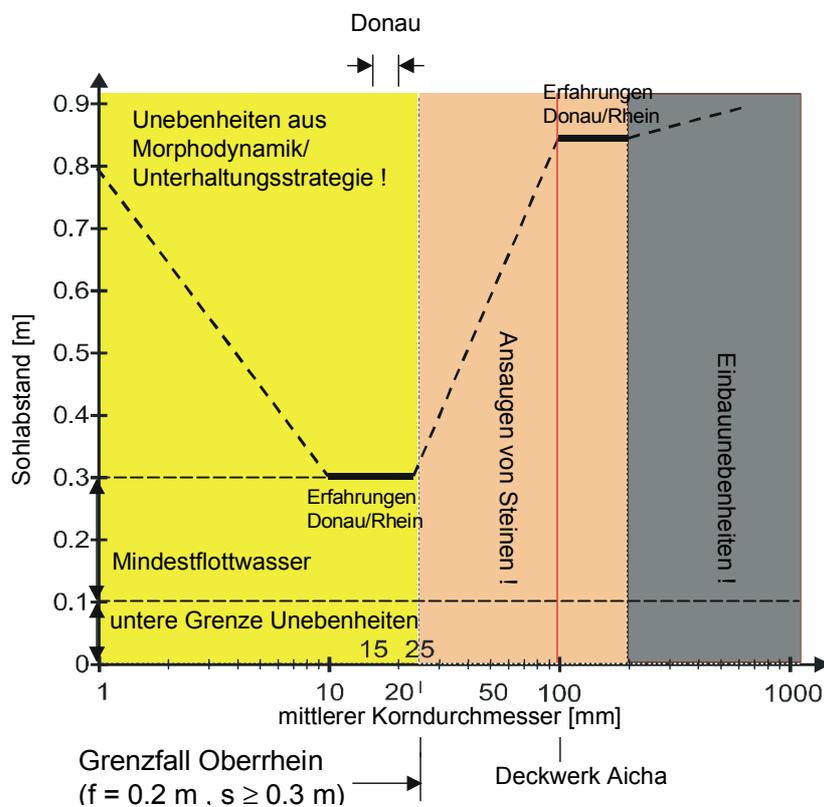


Abb. 8: Zusammenhang zwischen dem erforderlichen Sohlabstand und der Korngröße der Sohlensedimente – die fachlich abgesicherten durchgezogenen Linien sind für den Donauausbau relevant.

Um den Sohlabstand unter diesen Bedingungen quantifizieren zu können, wurde im Bereich Aicha, einer typischen Engstelle, ein Sohldeckwerk errichtet und es wurden Fahrversuche durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass das erforderliche Flottwasser ganz erheblich von der Schiffsform und den Antriebsorganen abhängig ist. Hierbei ist zu beachten, dass die Donauflotte überwiegend der Rheinflotte entspricht, deren Fahrzeuge i.d.R. nicht für extrem geringe Flottwassertiefen ausgelegt sind. Für diese Fahrzeuge ist deshalb ein Abstand zwischen Schiffsboden in Fahrt und mittlerer Gewässersohle (Sohlabstand) von ca. 0,8 bis 0,9 m zu einem Sohldeckwerk anzusetzen, damit Schäden aus angesaugten Steinen begrenzt bleiben. Für alle Kolkverbaumaßnahmen, die insbesondere bei den Varianten A und C in den engen Kurven zur Stabilisierung der Fahrrinnenbreiten vorgesehen sind, ist somit ein erhöhter Abstand zwischen dem Schiffsboden in Fahrt und der im Kolkbereich durch Deckwerke befestigten Sohle im vorgenannten Umfang vorzusehen. Die beabsichtigte morphologische Wirkung einer Kolkverbaumaßnahme war dadurch besonders bei Variante

C, bei der in der Strecke oberstrom der Isarmündung zusätzlich große Wasserspiegelabsenkungen gegenüber dem Ist-Zustand in Kauf genommen werden müssen (vgl. Abb. 12), beschränkt. Auch hier waren es also fahrdynamische Aspekte, die die Dimensionierung der Regelungs- und Sohlsicherungsmaßnahmen bestimmten und somit auch die Möglichkeiten und Grenzen dieser Maßnahmen im Hinblick auf größere Fahrrinnenquerschnitte festlegten.

### 3. Variantenabhängige Untersuchungen

#### 3.1 Variantenübersicht

Auf Abbildung 9 sind die wesentlichen Unterschiede der vier betrachteten Grundvarianten wie folgt verdeutlicht:

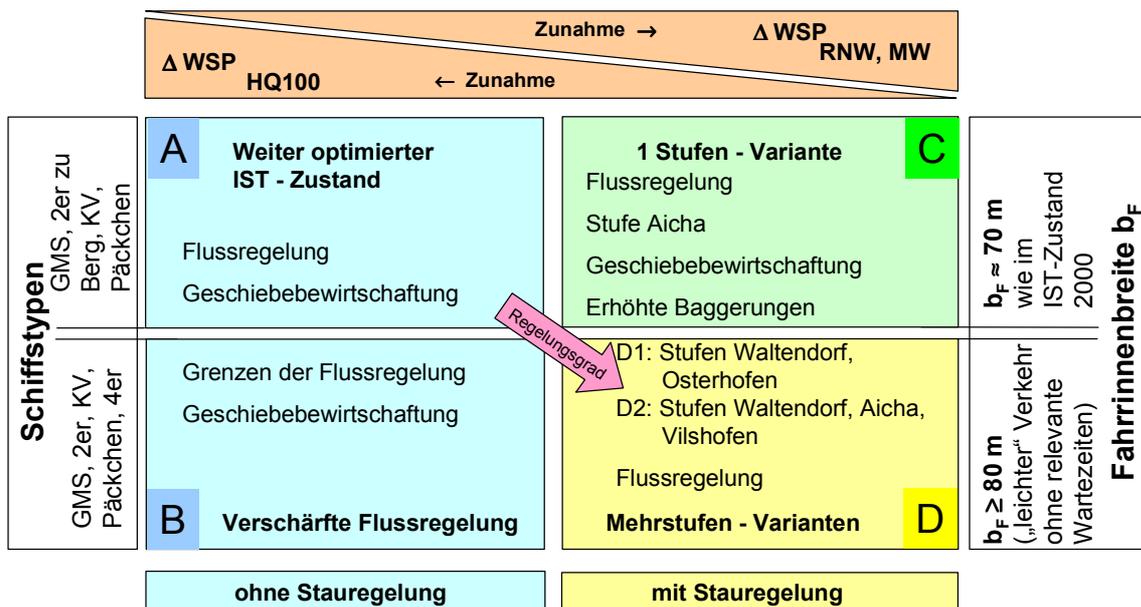


Abb. 9: Charakteristische Merkmale der untersuchten Varianten

Die oben dargestellten Varianten A und C gehen von den Fahrrinnenbreiten des Ist-Zustandes aus. Entsprechend ist der Verkehr auf die heute zugelassenen Fahrzeuge, d.h. Großmotorschiffe, Koppelverbände (Schiff + seitlich gekoppelter Leichter) in Berg- und Talfahrt sowie „Spargel-Schubverbände“ (GMS + davor gekoppelter Leichter) in der Bergfahrt beschränkt. Bei den unten dargestellten Varianten B und D wurde eine größere Fahrrinnenbreite gewählt, die Begegnungen der o.g. Fahrzeuge nahezu in der gesamten Ausbaustrecke ermöglichen soll, für Spargel-Verbände auch die Talfahrt zulässt und sogar eingeschränkt die Fahrt mit 4er-Schubverbänden ermöglicht.

Bei den beiden links dargestellten Varianten A und B werden ausschließlich flussregelnde Maßnahmen angewendet, wodurch z.B. die Wasserspiegeländerungen gegenüber dem Ist-Zustand begrenzt werden sollen. Rechts sind Varianten mit Staustufen angegeben. Bei Variante C wird mit nur einer einzigen Staustufe der nautisch, unterhaltungstechnisch und flussmorphologisch schwierigste Streckenabschnitt überstaut, für die Varianten D wurden 2 (D1) bzw. 3 (D2) Staustufen vorgesehen. Entsprechend groß sind dort die Wasserstandsänderungen gegenüber dem Ist-Zustand für Niedrig- und Mittelwasserverhältnisse und die Streckenlängen, auf denen diese auftreten. Bei Hochwasser sind bei den Varianten mit Stauregelung allerdings wesentlich geringere Auswirkungen zu beachten als bei den Flussregelungsvarianten. Bei letzteren ist ein Wasserspiegelanstieg beim Bemessungsabfluss für die Hochwassersituation  $HQ_{100}$  in der Regel nicht zu vermeiden, wenn nicht Ausgleichsmaßnahmen in den Vorländern ergriffen werden.

Dies liegt daran, dass mit einer Flussregelung zwar die gewünschten Eintiefungen des Gewässerbettes zwischen den Regelungsbauwerken erreicht werden können, wodurch in der Regel die Niedrigwasserstände mit den Sohlhöhen absinken, dass aber die erhöhte Systemrauheit bei Hochwasser den Einfluss der Sohleintiefungen überwiegt.

Mit den vorgenannten Varianten, dies zeigt die Abb. 9, sollte bei zunehmendem Regelungsgrad das Spektrum möglicher Ausbaumaßnahmen aufgezeigt werden, wobei mit Variante A, die die geringsten Eingriffe und die kleinsten Wasserspiegeländerungen aufweist, den Belangen des Naturschutzes besondere Rechnung getragen wurde und bei den Varianten D die Belange der Schifffahrt und des Hochwasserschutzes im Vordergrund standen. Variante C kann als Kompromiss beider Anforderungsbereiche, die nicht vollständig vereinbar sind, angesehen werden. Variante B erwies sich wegen der hierfür gewählten Fahrrinnenbreiten, die sich für eine Flussregelung als zu groß erwiesen, als diejenige mit dem geringsten Nutzen-Kosten-Verhältnis, d.h. dem geringsten schifffahrtlichen Nutzen bei trotzdem hohen Aufwendungen. Sie wird nachfolgend nicht weiter betrachtet.

Nachfolgend werden die wichtigsten im Rahmen der Variantenanalyse erzielten Ergebnisse geschildert. Sie wurden erzielt, indem nicht nur die hydraulischen, sondern auch die flussmorphologischen Wirkungen der Regelungsmaßnahmen, wobei es sich hierbei in der Regel um Eintiefungen handelt, für den Endzustand des Gewässerbettes im Langzeitbetrieb der Wasserstraße, berücksichtigt wurden. Im hier nicht näher betrachteten Anfangszustand werden auch bei den Flussregelungsmaßnahmen überwiegend Anhebungen der Wasserstände, selbst bei Niedrigwasser auftreten, während im Endzustand nach erfolgtem morphologischen Nachlauf die erwähnten Eintiefungen vorherrschen.

### **3.2 Ist-Zustand 2000**

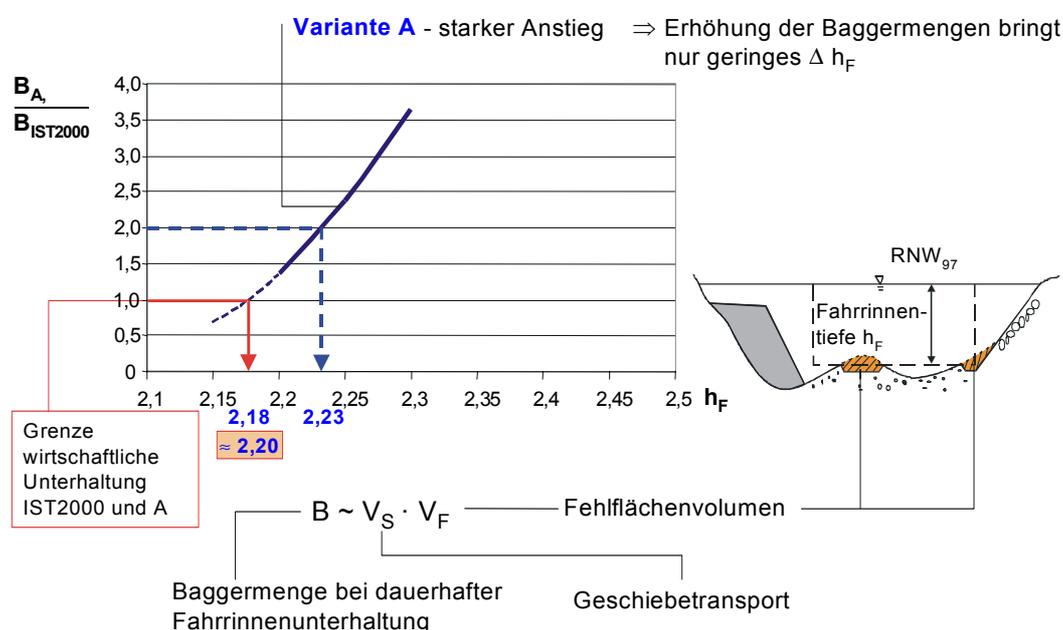
Für diesen Vergleichszustand aller Variantenanalysen wird angenommen, dass eine Fahrrinntiefe von 2,0 m unter dem Regulierungsniedrigwasserstand  $RNW_{97}$  dauerhaft aufrecht erhalten werden kann. Hierzu sind neben den heute schon ergriffenen Unterhaltungsmaßnahmen der Fahrinne weitere Maßnahmen der Geschiebemanagement mit den vorgenannten Zugabemengen, örtliche Instandsetzungsmaßnahmen der Regelungsbauwerke und Kolksicherungsmaßnahmen in den engsten Krümmungen, in denen das Tertiär an der Sohle frei liegt, erforderlich. Der für die Variantenanalysen vorausgesetzte Ist-Zustand 2000 ist somit mit Ausnahme der Fahrrinntiefe *nicht* der Gewässerzustand im Jahre 2000, sondern derjenige Zustand, der langfristig für den Erhalt der Wasserstände und Fahrrinntiefen erforderlich ist. Um die gegenüber dem Gewässerzustand vor Stauerrichtung in Straubing unterhaltbaren größeren Tiefen auch bei Mittelwasser nutzen zu können, wurde zusätzlich ein Mittelwasserengpass, der an der Stauwurzel der nachfolgenden Haltung im Bereich des sogenannten „Bürgerfeldes“ liegt, inzwischen ausgebaut.

Gegenüber dem bisherigen Gewässerzustand ergaben sich im oben definierten Ist-Zustand 2000 nur geringfügige Wasserspiegeländerungen. Die Schifffahrtsverhältnisse sind dagegen deutlich verbessert. Bei  $RNW_{97}$  können beispielsweise einspurige Fahrzeuge eine maximal möglichen Abladetiefe von 1,7 m erreichen. Unter Berücksichtigung der langen Transportentfernung errechnet sich hieraus eine durchschnittliche Abladetiefe von ca. 1,6 m. Nachfolgend werden nur diese durchschnittlichen bzw. mittleren Abladetiefen und daraus abgeleitete Werte genannt. Insbesondere bei Mittelwasser sind diese Werte bei einspurigen Fahrzeugen um nahezu 0,3 m größer als im Gewässerzustand vor Unterhaltung auf 2,0m, d. h. vor Stauerrichtung in Straubing und vor dem Bürgerfeldausbau.

### **3.3 Variante A**

Durch weitere Optimierung des Ist-Zustandes bei Variante A mit konventionellen flussregelnden Maßnahmen, wie die Verlängerung und der Neubau von Buhnen, kann eine Fahrrinntiefe von ca. 2,2 m unter  $RNW_{97}$  erreicht werden. Dieser Wert ergab sich aus den

Modellrechnungen unter Berücksichtigung des flussmorphologischen Nachlaufs und Abschätzungen über die Zunahme der Baggermengen bei größeren Fahrrinntiefen, wobei hierzu vereinfachte morphodynamische Modelle unter Beachtung der Ersterstellungsmengen verwendet wurden. Dabei erwiesen sich die im Langzeitbetrieb der Wasserstraße erforderlichen Baggermengen als linear proportional zu den Fehlflächenvolumen, die auf Abbildung 10 skizziert sind und gleichfalls als linear abhängig vom Geschiebetransportvermögen, das bei Variante A, wegen der weitgehend unveränderten Gefälleverhältnisse, in etwa dem des Ist-Zustandes entspricht. Die vorgenannte Fahrrinntiefe von 2,2 m ergab sich nach Abb. 10 aus der Bedingung, dass die Baggermengen nicht größer sein sollen als im Ist-Zustand 2000. Weiterhin zeigt Abbildung 10, dass eine Erhöhung der Fahrrinntiefe um nur ca. 5 cm zu einer Verdopplung der Unterhaltungsbaggermengen führen würde. Es wäre deshalb zwar im Grundsatz möglich, größere Fahrrinntiefen durch weiter intensivierte Unterhaltung zu erreichen. Eine solche Maßnahme wäre jedoch unter Beachtung des dazugehörigen Aufwandes technisch/wirtschaftlich nicht sinnvoll.



**Abb. 10:** Relative (auf den Ist-Zustand 2000) bezogene Baggermenge  $B$  für die dauerhafte Fahrrinnenunterhaltung als Funktion der Fahrrinntiefe bei Variante A.

Schließlich war bei Variante A die Randbedingung einzuhalten, dass aus ökologischen und wasserwirtschaftlichen Gründen die Wasserspiegellagen und Gefälleverhältnisse möglichst nicht verändert werden sollten. Örtlich, mit Ausnahme der Isarmündung, wurden Wasserstandsänderungen von 0,3 m bei Niedrigwasser zugelassen. An der Isarmündung sollten aus Gründen der Stabilität der Unteren Isar selbst geringe Wasserspiegelabsenkungen möglichst vermieden werden. Auch diese Bedingungen konnten im Dauerbetrieb der Wasserstraße, d.h. im rechnerischen Endzustand des Gewässerbettes bei Variante A eingehalten werden. Beim Bemessungsabfluss für die Hochwassersituation  $HQ_{100}$  ergab sich allerdings im rechnerischen Anfangszustand des Gewässerbettes, d. h. unmittelbar nach Durchführung der Ausbaumaßnahmen, eine Wasserspiegelanhebung von örtlich maximal 0,2 m, im Streckenmittel von ca. 1 dm. Dies erfordert bei Variante A Ausgleichsmaßnahmen.

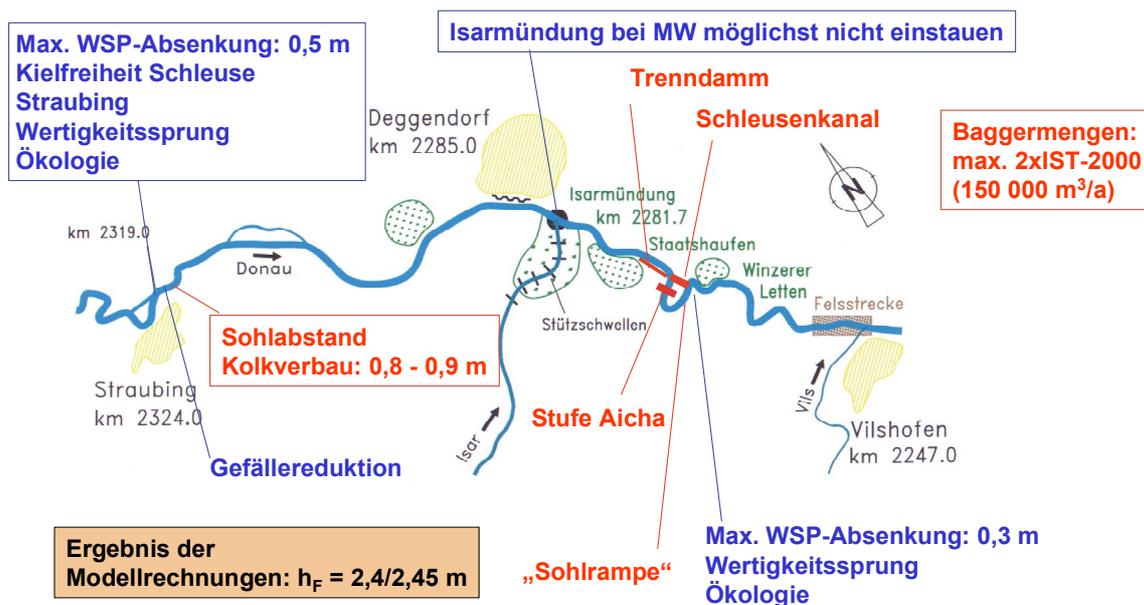
Die gegenüber dem Vergleichszustand um 0,2 m größeren Fahrrinntiefen können bei Variante A nur bei Niedrigwasser von der Schifffahrt vollständig in größere Abladetiefen umgesetzt werden. Bei Mittelwasser und für noch größere Abflüsse ist eine Steigerung gegenüber dem Vergleichszustand aus fahrdynamischen Gründen vernachlässigbar gering.

Deshalb beträgt die Steigerung der Abladetiefe im Jahresdurchschnitt nur etwa die Hälfte des Wertes bei RNQ<sub>97</sub>. Der zugehörige, für ein durchschnittliches Abflussjahr errechnete, Auslastungsgrad einspuriger Fahrzeuge steigt dabei im Mittel um rund 5 % gegenüber dem Vergleichszustand auf ca. 74 % an, für zweispurige Fahrzeuge steigt er um 8 % auf ca. 48 % an. Die Erhöhung des Auslastungsgrades der zweispurigen Fahrzeuge, hier der Koppelverbände, ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass sie im Ausbauzustand der Variante A an rund 10 % des Jahres länger verkehren können als im Ist-Zustand 2000, da der nautische Mindesttiefgang dieser breiten Fahrzeuge von 1,8 m länger überschritten wird.

### 3.4 Variante C

Bei Variante C wird die Steilstrecke zwischen der Isarmündung und Winzer durch eine Staustufe bei Aicha überstaut, siehe Abbildung 11, auf der die Stufenstelle bei Variante C im Lageplan eingezeichnet ist. Das Stauziel von 309,0 m über NN wurde so gewählt, dass die Isarmündung ab Mittelwasser nicht mehr eingestaut ist.

Den negativen Auswirkungen des Staus im Bereich der Isarmündung und im unterstrom anschließenden Naturschutzgebiet Staatshaufen, das von besonderer ökologischer Bedeutung ist, wird durch Maßnahmen der Abfluss- und Wasserstandssteuerung in diesem Bereich begegnet. Hierzu wird eine Aufhöhung des rechten Ufers im vorgenannten Bereich bis zur Stufenlage vorgesehen, damit die Wasserstände von Hauptstrom und Altwassergebiet entkoppelt sind. Weiterhin werden die



Altwässer an das Unterwasser der Stufe angeschlossen.

Abb. 11: Verkehrswasserbauliche Randbedingungen der Variante C

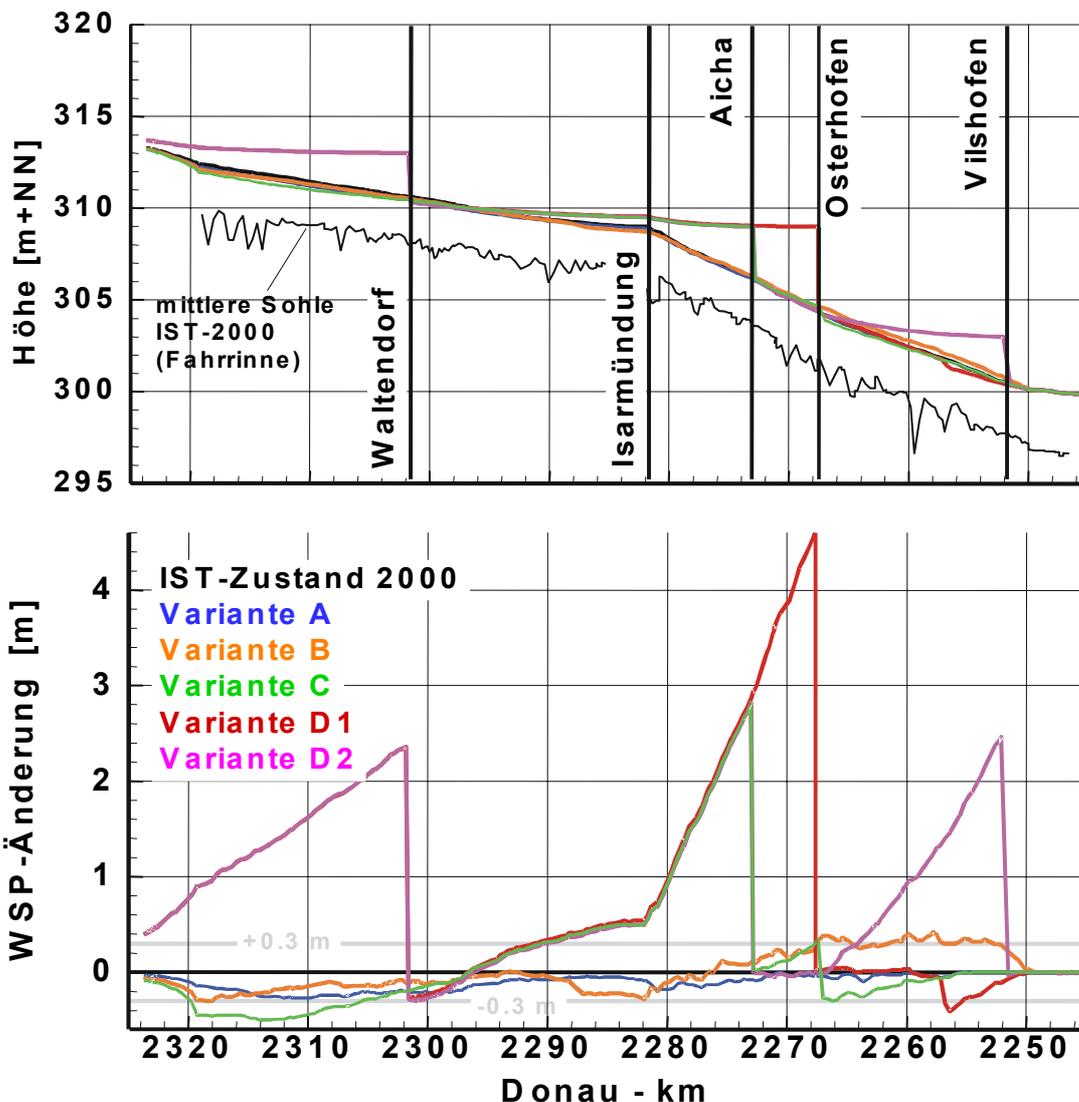
Die Flussregelungs- und Sohlsicherungsmaßnahmen entsprechen mit Ausnahme des unmittelbaren Staubereichs und der großen Mühlhamer Schleife, die unterstrom der Staustufe liegt und die bei Variante C durch einen Schleusenkanal von der Schifffahrt umgangen wird und unterstromseitig durch eine Sohlrampe gestützt wird, der Variante A. Die Auswirkungen des Staubereichs sind somit auf eine begrenzte Strecke und überwiegend auf eine Uferseite beschränkt.

Nur bei Niedrigwasser ergeben sich im Isarmündungsgebiet Anhebungen der Wasserstände um rund 0,5 m. Diese Anhebungen reichen wegen der geringen Gefälle des heutigen Donaustroms zwischen Straubing und der Isarmündung jedoch bis weit nach oberstrom, d.h. die Stauwurzel, wird sie als Schnittpunkt der künftigen Wasserspiegellagen

mit den heutigen Wasserspiegellagen definiert, liegt bei Niedrigwasser rund 12 km oberstrom der Isarmündung.

Unter Inkaufnahme von Wasserspiegelabsenkungen oberstrom dieser Stauwurzel können die Gefälle dadurch nahezu in der gesamten Teilstrecke oberstrom der Isarmündung reduziert werden. Dies ermöglicht größere Wassertiefen und damit Fahrrinntiefen. Durch das Zulassen von Eintiefungen auch unterstrom der Stufe Aicha, genauer unterstrom der großen Mühlhamer Schleife, können auch dort die Gefälle so weit reduziert werden, dass die Fahrrinntiefen mindestens auf den oberstrom der Isar erreichbaren Wert angehoben werden können. Ausgelöst werden diese Gefälleänderungen durch geringere Geschiebezugaben als im Ist-Zustand.

Die zugehörigen Wasserstandsänderungen, die ihren Höchstwert am oberstromseitigen Rand der Ausbaustrecke mit ca. 0,5 m bei  $RNW_{97}$  erreichen (vgl. Abb. 12), dürfen jedoch nicht größer als der vorgenannte Wert werden, damit die Schiffe im Ausbauzustand mit größeren Abladetiefen als im Ist-Zustand noch in die Schleuse Straubing einfahren können. Auch ökologische Aspekte definierten die maximal bei Variante C tolerierten Wasserspiegelabsenkungen im Bereich Straubing und im Unterwasser der Stufe Aicha, siehe hierzu Abbildung 12, auf der die Wasserstandsänderungen bei  $RNW_{97}$  für die



Variante C im Vergleich zu den anderen Varianten dargestellt sind.

Abb. 12: Wasserspiegellagen im Hauptstrom und zugehörige Änderungen bei den Varianten A, B, C und D zum Ist-Zustand 2000 beim Bemessungs-Niedrigwasserabfluss  $RNW_{97}$

Trotz der Wasserstandsabsenkungen ist die Gefällereduktion, bei nur einer Staustufe, die bei Mittelwasser noch einen Bereich von ca. 10 km von insgesamt 72 km überstaut, auf die gesamte Strecke bezogen, beschränkt. Unter Beachtung einer möglichst wirtschaftlichen Fahrrinnenunterhaltung ist deshalb das flussbaulich Erreichbare auch bei Variante C begrenzt. Dennoch kann eine Fahrrinntiefe von etwa 2,4 m bei RNW<sub>97</sub> erreicht werden, wobei ca. 0,1 m dieses Wertes auf eine gegenüber dem Ist-Zustand 2000 weiter intensiviertere Unterhaltung zurückzuführen ist.

Dies ist bei Variante C deshalb zulässig, weil die bisher unterhaltungsintensivsten Stellen überstaut sind und die im Ausbau kritischen Stellen örtlich konzentriert sind. Bei Variante C werden die Fließgeschwindigkeiten im staubeeinflussten Bereich gegenüber dem Ist-Zustand 2000 von der Stauwurzel zur Stufenstelle hin zunehmend verringert. Die Anhebung des Wasserstandes an der Stufenstelle um 2,8 m bei RNW<sub>97</sub> führt dabei zu einer Reduktion um ca. 0,8 m/s gegenüber dem Ist-Zustand 2000. Der für die ökologische Bewertung wichtige Grenzwert der mittleren Fließgeschwindigkeit von 0,4 m/s wird jedoch nur singular und auch nur beim o.g. Niedrigwasserstand unterschritten. Damit diese Randbedingung eingehalten werden konnte, musste das Stauziel begrenzt werden.

Auch bei Variante C steigt der Wasserstand bei HQ<sub>100</sub> im rechnerischen Anfangszustand in den stark geregelten Strecken an, jedoch geringer als bei Variante A. Ausgleichsmaßnahmen zur Gewährleistung der Hochwasserneutralität sind dennoch in begrenztem Umfang erforderlich.

Bei Variante C können einspurige Fahrzeuge bei Niedrigwasser eine mittlere Abladetiefe von ca. 2,0 m erreichen, also ca. 0,4 m mehr als im Vergleichszustand. Schon für Wasserstände knapp unterhalb Mittelwasser kann so tief abgeladen werden, nämlich ca. 2,7 m, wie in den angrenzenden Stauhaltungen und im Main-Donau-Kanal. Die größeren Fahrrinntiefen bei Variante C können somit auch bei höheren Wasserständen noch in eine signifikant größere Abladetiefe umgesetzt werden. Dies liegt daran, dass das fahrdynamische Einsinken geringer ist als bei den durchgehend flussregelnden Varianten, insbesondere in der bei Variante C überstauten Steilstrecke zwischen der Isarmündung und der Mühlhamer Schleife. Der zugehörige Auslastungsgrad liegt im Mittel bei ca. 78 % und ist damit um 9 % größer als im Ist-Zustand 2000, aber noch ca. 9 % geringer als bei den Varianten D. Auch diese Betrachtung zeigt, dass Variante C in etwa in der Mitte zwischen A und D angesiedelt ist.

Da die nautisch schwierigste Strecke überstaut ist, können auch zweispurige Fahrzeuge wesentlich tiefer abladen und vor allem wesentlich länger verkehren als im Vergleichszustand. Der errechnete durchschnittliche Auslastungsgrad von 71 % steigt sogar um 31 % gegenüber dem Ist-Zustand 2000 an. Die Variante C ermöglicht somit einen wirtschaftlichen Verkehr auch und vor allem mit zweispurigen Verbänden.

Zusammenfassend sind die v.g. Abladetiefen der volkswirtschaftlich wichtigsten einspurigen Fahrzeuge für Variante C im Vergleich zu den anderen Varianten auf Abb. 13 in Form von Dauerlinien dargestellt. Auf der horizontalen Achse sind jeweils die Unterschreitungstage des zugehörigen Abflusses angegeben, auf der vertikalen Achse die erreichbaren mittleren Abladetiefen im Langstreckenverkehr. Zum Vergleich sind die Abladetiefen auf dem Rhein in der für den Wechselverkehr mit der Donau kritischsten Strecke, die durch den Pegel Kaub repräsentiert ist, dargestellt.

Die Abb. 13 zeigt unter anderem, dass Variante A im Mittel immer noch deutlich geringere Abladetiefen zulässt als die o.g. Gebirgsstrecke des Rheins, obwohl dort bei Niedrigwasser keine größeren Abladetiefen möglich sind als bei Variante A. Dies liegt vor allem daran, dass der Wasserstandsanstieg bei höheren Abflüssen am Rhein wesentlich größer ist als an der Donau und dass die Tiefenverhältnisse aufgrund vorhandener Übertiefen und geringerem fahrdynamischem Einsinken am Rhein besser ausgenutzt werden können als an der Donau.

Erst mit Variante C wird ein Ausbauzustand erreicht, der bei Niedrigwasser sogar etwas bessere Verhältnisse bietet als die Gebirgsstrecke des Rheins, für höhere Wasserstände aber immer noch schlechter ist. Dennoch können im volkswirtschaftlich wichtigen Wechselverkehr mit dem Rhein, der rund 60 % aller Transporte, die die Strecke Straubing - Vilshofen derzeit durchlaufen, betrifft, im Jahresdurchschnitt bei Variante C in etwa gleiche *durchschnittliche* Abladetiefen erreicht werden wie in der Gebirgsstrecke des Rheins.

Bei zunehmendem Verkehr von und zum osteuropäischen Raum, wobei die Schiffe unterstrom Vilshofen deutliche günstigere Fahrwasserverhältnisse vorfinden als in der Ausbaustrecke bzw. sogar günstigere als am Rhein, wären aus Gleichwertigkeitsgründen größere Abladetiefen als bei Variante C zu fordern. Mit Variante D kann in etwa der Standard erreicht werden, der in den staugeregelten Strecken bisher vorliegt.

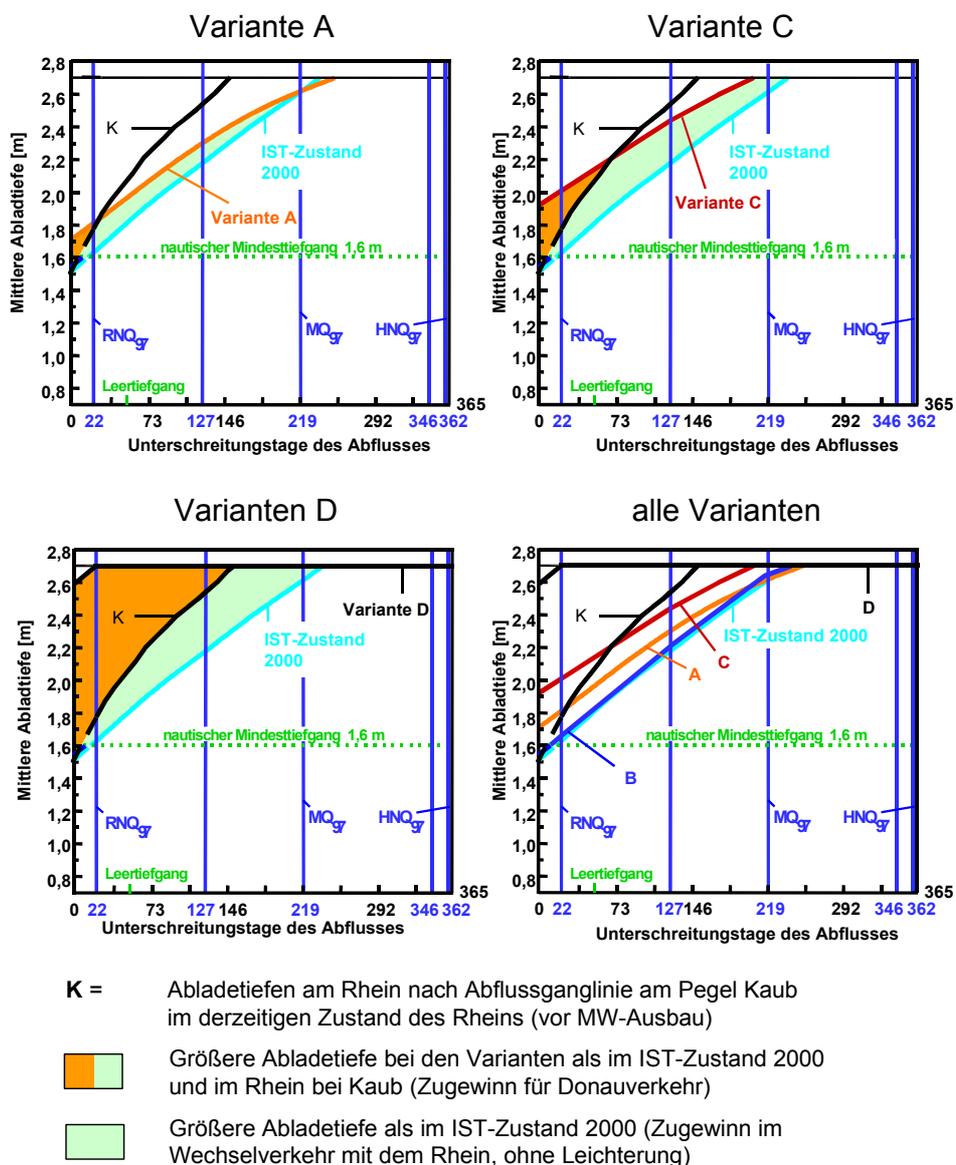


Abb. 13: Mögliche Abladetiefen einspuriger Fahrzeuge im Donauabschnitt als Funktion des Abflusszustandes

### 3.5 Varianten D

Hierzu sind bei der Variante D1 Stufen bei Waltendorf (Stauziel 313,0 m über NN, 0,75 m geringer als bei der Raumordnungslösung von 1992) und Osterhofen (Stauziel 309,0

m über NN), in Kombination mit einem verlängerten Schleusenkanal bis Pleinting (ersetzt Stufe Vilshofen) erforderlich. Die dreistufige Variante D2 verwendet Stufen bei Waltendorf (Stauziel 313,0 m über NN), Aicha (Stauziel 309,0 m wie bei Variante C) und Vilshofen (Stauziel 303,0 m über NN). Ergänzt werden die Staumaßnahmen durch örtliche Fahrrinnenbaggerungen und Sohlsicherungsmaßnahmen.

Die Wasserspiegelanhebungen betragen bei der Stufe Waltendorf ca. 2,3 m bei RNW<sub>97</sub> bzw. ca. 1,1 m bei Mittelwasser. An der Stufe Aicha errechnen sich Anhebungen bei der Dreistufenlösung von ca. 2,8 m bzw. 1,7 m, an der Stufe Osterhofen für die Einstufenlösung von 4,6 m bzw. 3,4 m und an der Stufe Vilshofen von ca. 2,4 m bei RNW<sub>97</sub> bzw. ca. 1,6 m bei Mittelwasser. Die Wasserspiegelabsenkungen betragen bei RNW<sub>97</sub> maximal 0,3 m im Unterwasser der Stufe Waltendorf und ca. 0,4 m in der Einmündung des Schleusenkanals bei Pleinting bei der Variante D1.

Bei HQ<sub>100</sub> wird der Wasserstand gegenüber dem Ist-Zustand 2000 im Durchschnitt abgesenkt. Ausgleichsmaßnahmen sind deshalb in der Regel nicht erforderlich. Die mittleren Fließzeiten werden in den Staustrecken jedoch zum Teil stark reduziert. Sie steigen bei den Varianten D1 und D2 gegenüber dem Ist-Zustand um rund 50 % an. Die ökologischen Auswirkungen werden durch Maßnahmen der Wasserbewirtschaftung wie bei Variante C so weit wie möglich abgemindert. Dennoch sind die negativen Auswirkungen, insbesondere durch Anhebung der Grundwasserstände und durch Einschränkung der fluviatilen Vernetzung, deutlich größer als bei den Varianten C und A. Deshalb ergibt sich bei der ökologische Bewertung eine Reihung von A über C nach D.

Da der Auslastungsgrad bei den Varianten D mit ca. 87 % für einspurige Fahrzeuge um ca. 18 % gegenüber dem Ist-Zustand 2000 ansteigt, bei zweispurigen Fahrzeugen sogar um 46 % auf 86 %, ist der schiffahrtliche Nutzen bei den Varianten D am größten und bei Variante A am kleinsten. Da aber auch die Investitionssummen steigen, ist das für die volkswirtschaftliche Bewertung herangezogene Nutzen-Kosten-Verhältnis bei den Varianten D sogar etwas geringer als bei den Varianten C und A. Wegen der geringsten Kosten für die Realisierungsmaßnahmen erreicht A das höchste Nutzen-Kosten-Verhältnis.

#### **4. Schlussbemerkungen**

Mit den vertieften Untersuchungen zum Donauausbau, deren Ergebnisse hier kurz skizziert wurden, konnte das verkehrswasserbaulich Erreichbare der einzelnen Varianten im Vergleich zum Ist-Zustand 2000 mit einer für die angestrebte Grundsatzentscheidung ausreichenden Genauigkeit aufgezeigt werden. Weiterhin konnten Grundlagen für die Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft und die Ökologie geschaffen werden. Dies heißt nicht, dass im Rahmen einer weiteren Detailplanung einer Zielvariante kein Optimierungspotenzial mehr bestünde. Dies gilt insbesondere für die Sohlsicherungsmaßnahmen, die erforderlichen Unterhaltungsaufwendungen und die Wasserspiegeländerungen gegenüber dem Vergleichszustand. Im relativen Variantenvergleich spielt dieses begrenzte Optimierungspotenzial jedoch weder für die ökologische, wasserwirtschaftliche noch für die ökonomische Bewertung eine entscheidende Rolle, da alle Varianten auf der gleichen Basis untersucht wurden.

Da auch die Nutzen-Kosten-Verhältnisse, selbst bei den diesbezüglich ungünstigsten Varianten, noch einem Wert erreicht, der eine hohe volkswirtschaftliche Rendite verspricht, kann somit aus ökonomischen Gründen nicht unbedingt einer Variante der Vorzug gegeben werden, zumal neben dem Nutzen-Kosten-Verhältnis auch die Nutzen-Kosten-Differenz heranzuziehen ist.

Die Entscheidung zugunsten der einen oder der anderen Variante ist somit unter Abwägung aller relevanten Aspekte, insbesondere der Leichtigkeit, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit des Schiffsverkehrs, der Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft, hier insbesondere der Hochwasserstände, des Ökosystems und natürlich der Volkswirtschaft,

letztlich auf gesellschaftspolitischer Ebene zu treffen. Die Ingenieure haben ihren Beitrag für eine Entscheidungsfindung beigetragen.

## **5. References**

B. Söhngen, J. Kellermann, H.-H. Witte: „Investigations concerning river engineering works to improve navigation, restricted by requirement of water resources, flood control and ecology“; ICERD-Conference, Budapest, April 1998

B. Söhngen, M. Möhling: „Prognose von flussmorphologisch bedingten Unebenheiten in kiesführenden Flüssen im Hinblick auf mögliche Fahrrinnenquerschnitte“; 22. IHP-UNESCO-Conference of Danube Countries, September 2000;

B. Söhngen, „Fahrdynamische Modelluntersuchungen“, Mitteilungsblatt Nr. 80, BAW, 1999

B. Söhngen, „Three aspects of ship waterway interaction in gravel bed rivers: bed unevenness and fairway cross sections, keel clearance for coarse sediments and ship induced bed load“, „La Houille Blanche“ 8-2001