

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Article, Published Version

**Kellermann, Jürgen**

## **Donauausbau Straubing - Vilshofen - vertiefte Untersuchungen**

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102717>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Kellermann, Jürgen (1999): Donauausbau Straubing - Vilshofen - vertiefte Untersuchungen. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 80. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 65-78.

### **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.



# Donauausbau Straubing – Vilshofen, vertiefte Untersuchungen 1D-Modellverfahren Modelltechnik, 3D-Untersuchungen, Bühnen, flussmorphologische Änderungen

DIPL.-ING. JÜRGEN KELLERMANN, BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU

## Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag soll die *Methodik* der in den vertieften Untersuchungen zum Donauausbau Straubing-Vilshofen verwendeten eindimensionalen Modelluntersuchungen erläutert werden. Dabei wird ein besonderer Schwerpunkt auf die eingesetzte Modellierungstechnik sowie die Berücksichtigung flussmorphologischer Änderungen gelegt. Eine Ergebnisdarstellung kann zu dieser Zeit nur bezüglich der Modellkalibrierung erfolgen. Die Variantenanalyse ist derzeit noch nicht abgeschlossen.

## Einführung

Im Rahmen der Planungen zum Donauausbau Straubing – Vilshofen wurden 1996, zur stärkeren Berücksichtigung ökologischer Belange, flussregelnde Maßnahmen in der Teilstrecke Straubing – Isarmündung unter der Randbedingung einer Staustufe im Bereich unterstrom der Isarmündung untersucht (Witte et al. 1997, Kellermann et al. 1998). Nach Abschluss dieser Untersuchungen beschlossen Bund und Bayern für eine politische Richtungsentscheidung im Jahr 2000 die Untersuchungen auf die gesamte Strecke zwischen Straubing und Vilshofen auszuweiten, mit dem Ziel, für das ganze Spektrum möglicher Varianten eine gleichwertige, vergleichbare Untersuchungstiefe zu erhalten. Die Spannweite der Varianten umfasst dabei den IST-Zustand mit einer Tiefe von mindestens 2 m auf der gesamten Fahrrinnenbreite und ausgebautem Bürgerfeld, wie er etwa im Jahr 2000 hergestellt sein wird (IST-Zustand 2000), eine flussbauliche Lösung ohne Staustufen auf der Basis der bestehenden Fahrrinne (Variante A), eine verschärfte Flussregelung bei einer größeren Fahrrinnenbreite (Variante B), eine Variante mit einer Staustufe (Variante C) sowie mehreren Staustufen (Variante D). Im Rahmen dieses Beitrags wird auf die Methodik der hydrodynamisch-numerischen Modellierung (HN-Modellierung) der in der BAW erstellten Modelle eingegangen.

Ergebnisse dieser HN-Modellierung sind im Wesentlichen Wasserstände, Fließtiefen und Fließgeschwindigkeiten. Sie werden verwendet als

- hydraulische Eingangsgrößen in fahrdynamischen Modellrechnungen zur Ermittlung von Schiffsgeschwindigkeiten und Absinkverhalten (Söhngen, 1999),
- abiotische Parameter für ökologische Untersuchun-

gen, aus denen sich zusätzliche Aussagen zu z.B. Überflutungsdauern ableiten lassen,

- Instrument zum Aufzeigen heutiger Problemstellen der Schifffahrt,
- Lieferant von Randbedingungen zur physikalischen Modellierung des Isarmündungsbereichs (Roßbach et al., 1999) und
- Grundlage zum Aufzeigen des weiteren Optimierungspotentials.

Vor dem Hintergrund der für die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Varianten in einer politischen Entscheidung erforderlichen Untersuchungstiefe wurde ein eindimensionales Modellverfahren zur hydraulischen Berechnung der *Gesamtstrecke* gewählt. Diese Verfahren gehen von flächengemittelten Kenngrößen aus wie z.B. der Fließgeschwindigkeit und im Querprofil konstantem Wasserstand und Reibungsgefälle in charakteristischen Berechnungsquerschnitten. Darüber hinaus muss die Annahme einer langsam veränderlichen Strömung zwischen zwei Querprofilen erfüllt werden. Mehrdimensionale Effekte wie Strömungen in Bühnenfeldern oder die in Krümmungen auftretende Sekundärströmung können nur über parametrisierte Ansätze erfasst bzw. müssen ganz vernachlässigt werden. Somit sind Ergebnisse eindimensionaler Berechnungen im Wesentlichen für das Großraumverhalten geeignet. Die Modellierung von komplexen Strömungsphänomenen, z.B. Ablösezonen oder Querströmungen, sind nicht möglich. Detaillierte Ergebnisdarstellung wie z.B. Fließgeschwindigkeitsverteilungen im Querschnitt, die aus Reibungsgefälle und örtlicher Fließtiefe abgeleitet werden kann, sind nur eingeschränkt möglich. Um detailliertere Aussagen zu erhalten, sind weitergehende Modellierungstechniken erforderlich.

Eine Möglichkeit der Verbesserung der Aussage eindimensionaler HN-Rechnungen bietet die Verwendung verzweigter und vermaschter Modelle. Hierbei werden Bereiche des Querprofils, wie z.B. Vorländer, deren Abflussverhalten in eigenen 1D-Strängen approximiert werden kann, vom Flussbett abgetrennt und in Teilmodelle zerlegt. Diese Teilmodelle werden zu einem vernetzten Gesamtmodell zusammengefügt. Dabei werden die in jedem Teilmodell erforderlichen Randbedingungen als innere Randbedingungen von Teilmodell zu Teilmodell übergeben. Lediglich an den äußeren Rändern müssen Vorgaben bezüglich Wasserstand und Abfluss gemacht werden. Auf diese Weise kann, unter anderem, dem oftmals kürzeren Fließweg über das Vorland (z.B. Krümmungen zwischen Straubing und Hafen Sand) mit steilerem Gefälle und in der Regel niedrigerer Fließge-

schwindigkeit als im Hauptgerinne Rechnung getragen werden. In diesen Strängen wird ein kontinuierlicher Abfluss durch Kontrolle der Zu- und Abströmungen besser erreicht, als in streng eindimensionalen Berechnungen, in denen dies für das ganze Abflussspektrum an jedem Berechnungspunkt durch Kalibrierung der fließtiefenabhängigen Stricklerwerte erforderlich ist. Um die Schärfe der Untersuchungsergebnisse weiter zu steigern, werden in der abschließenden Ergebnisauswertung, die nicht Gegenstand dieses Beitrags ist, nur Relativbetrachtungen zu anderen Berechnungszuständen betrachtet. Auf diese Weise können modellbedingte Abweichungen verkleinert werden.

## Modellerstellung und Kalibrierung

Bild 1 gibt eine schematische Übersicht des Modellgebietes mit den wesentlichen hydraulischen Rand-

stromige Rand der Isar in das Unterwasser der Staustufe Pielweichs bei km 10,2 gelegt.

- Durch das bayerische Landesamt für Wasserwirtschaft wurden Abflüsse für das Bemessungshochwasser (100-jährliche Hochwasser,  $HQ_{100}$ ) vorgegeben. Um diese zu berücksichtigen ist der Zufluss der Vils bei km 2248,6 erfasst worden.
- Da bei  $HQ_{100}$  keine Aussagen über Wasserstände, die am unteren Rand des Untersuchungsgebietes auftreten, vorlagen, wurde das Modell über den unteren Rand des Untersuchungsgebietes bei Vilshofen hinaus bis zur Staustufe Kachlet verlängert.

Zur Kalibrierung wurden drei Modelle mit Querprofilpeilungen des WSA Regensburg von 1990, 1995 und 1998 mit einem mittleren Querprofilabstand von ca. 300 m erstellt. Weiterhin wurden u.a. Daten aus Altwasserpeilungen, Bühnen- und Parallelwerksvermessungen, mehrere Befliegungen, terrestrische Aufmessungen und

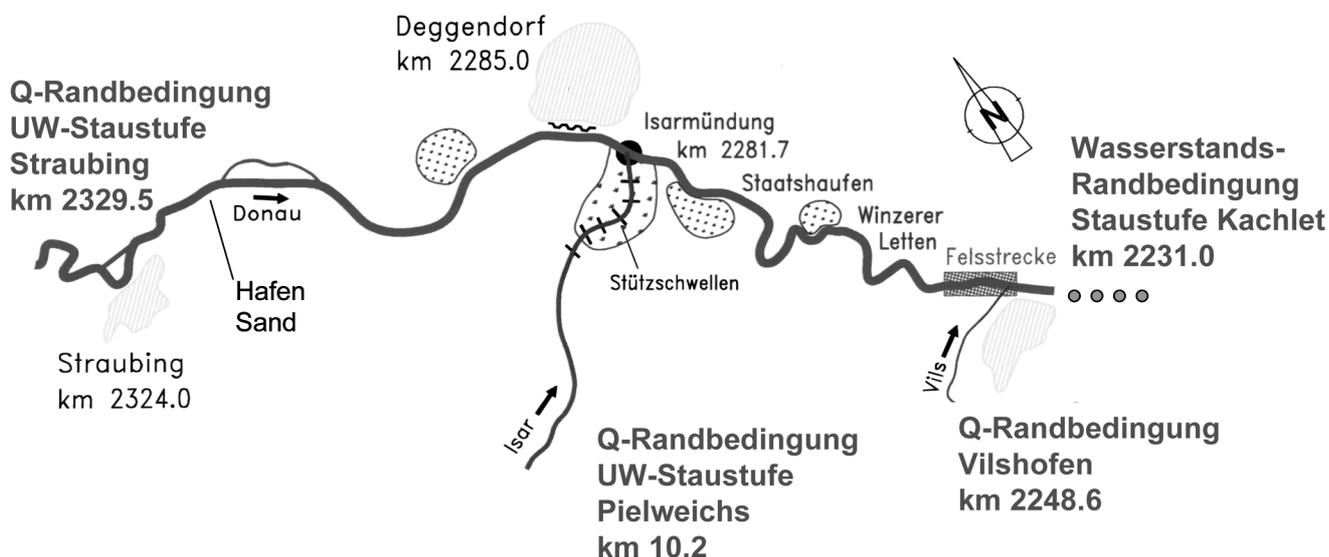


Bild 1: Übersicht des Modellgebietes mit wesentlichen hydraulischen Randbedingungen

bedingungen wieder, die im Folgenden kurz beschrieben werden:

- Der Bereich des von der Schifffahrt genutzten Untersuchungsgebietes der Donau beginnt an der Einmündung des Schleusenkanals der Staustufe Straubing in die Donau bei km 2319. Der oberstromige Rand des HN-Modells mußte davon abweichend in das Unterwasser der Staustufe Straubing gelegt werden, da der Abfluss des rechten Vorlandes am unteren Ende des Wehrrams durch die Strömungsverhältnisse in Wehrram und Schleusenkanal – ein Teil des Hochwasserabflusses erfolgt durch den Schleusenkanal und wird vom Wasserstand bei km 2319 kontrolliert - beeinflusst wird.
- Im Bereich der Unteren Isar wird im Hochwasserfall der Vorlandabfluss zum Teil durch Bedingungen mehrere Kilometer oberstrom der Mündung geprägt. Um diesen Effekt zu berücksichtigen, wurde der ober-

Sohlbeprobungen zur Modellerstellung verwendet. Zur Kalibrierung wurden aus der Fülle der Wasserspiegel-fixierungen der letzten Jahrzehnte nur diejenigen verwendet, die etwa zur gleichen Zeit erhoben wurden wie die entsprechende Querprofilpeilung. Trotzdem muss ein möglichst weites Abflussspektrum (190 m<sup>3</sup>/s bis 2570 m<sup>3</sup>/s im Bereich oberstrom und 294 m<sup>3</sup>/s bis 3020 m<sup>3</sup>/s im Bereich unterstrom der Isarmündung) berücksichtigt werden. Eine Kalibrierung auf der Basis von gewässerkundlichen Daten, die als statistische Werte die Abflussereignisse mehrerer Jahre zusammenfassen und nur alle 4 bis 8 Jahre aktualisiert werden, besitzen nur eine begrenzte Aussageschärfe.

Da 1995 mit der Vertiefung der Donau im Bereich Deggendorf - Straubing von 1,7 m auf 2,0 m begonnen wurde, ist es nicht sicher gewährleistet, dass die gemessenen Wasserspiegel-fixierungen und die gepeilten Sohlprofile des gleichen Jahres zusammenpassen. Somit ist

der Modellzustand 1995 zur Kalibrierung nur bedingt geeignet. Da für den Peilzustand 1990, der seit den siebziger Jahren im Wesentlichen nach gleichen Kriterien unterhalten wurde und somit morphologisch relativ geringen Änderungen unterliegt, umfangreiche, für nahezu das ganze Abflussspektrum zwischen extremem Niedrigwasser und Hochwasser vom März 1988, Wasserspiegelfixierungen vorlagen, wurde dieser Zustand zur Kalibrierung der Rauheitsbeiwerte verwendet.

Darüber hinaus ist noch mit der 1998 durchgeführten Querprofilpeilung ein weiteres Modell erstellt worden. Dieses Modell, in das die kalibrierten Rauheitsbeiwerte des Modells von 1990 übernommen wurden, wurde mittels Wasserspiegelfixierungen von 1997 und 1998 und Geschwindigkeitsmessungen von 1998 verifiziert.

Einen Auszug der Netztopologie der vermaschten Modelle zeigt Bild 2. Im rechten Vorland wurde ein eigenständiger Strang angelegt. Um Austauschvorgänge zu

Da die Insel im Oberwasser einen Landanschluss besitzt, wurde an dieser Stelle ein Wehrelement vorgesehen, so dass die Simulation von Ansprungsbedingungen gewährleistet ist.

Die Kalibrierung der fließtiefenabhängigen Rauheitsbeiwerte erfolgte in drei Stufen (Bild 3). Bei Niedrigwasserabflüssen wird die Systemrauheit im Wesentlichen durch die Kornrauheit des morphologisch aktiven Bereichs bestimmt. Da bei diesen Abflüssen in der Regel kein Sedimenttransport stattfindet, ist eine Formrauheit im Sinne einer „worst case“-Betrachtung für Ökologie und Schifffahrt nicht zu berücksichtigen. Diese Rauheitsbeiwerte wurden zwischen den Regelungselementen anhand der Kornverteilungen gemessener Sohlproben geschätzt (Söhngen, 1995) und mit gemessenen Niedrigwasserfixierungen überprüft. Bei höheren, bis etwa bordvollem Wasserständen ist die Rauheitswirkung von Buhnen und Parallelwerken mit parameterbehafteten Ansätzen (Ritzert et al., 1998) zusätzlich zu berücksichtigen. Zur

## ● Verzweigungsknoten      ○ Berechnungspunkt

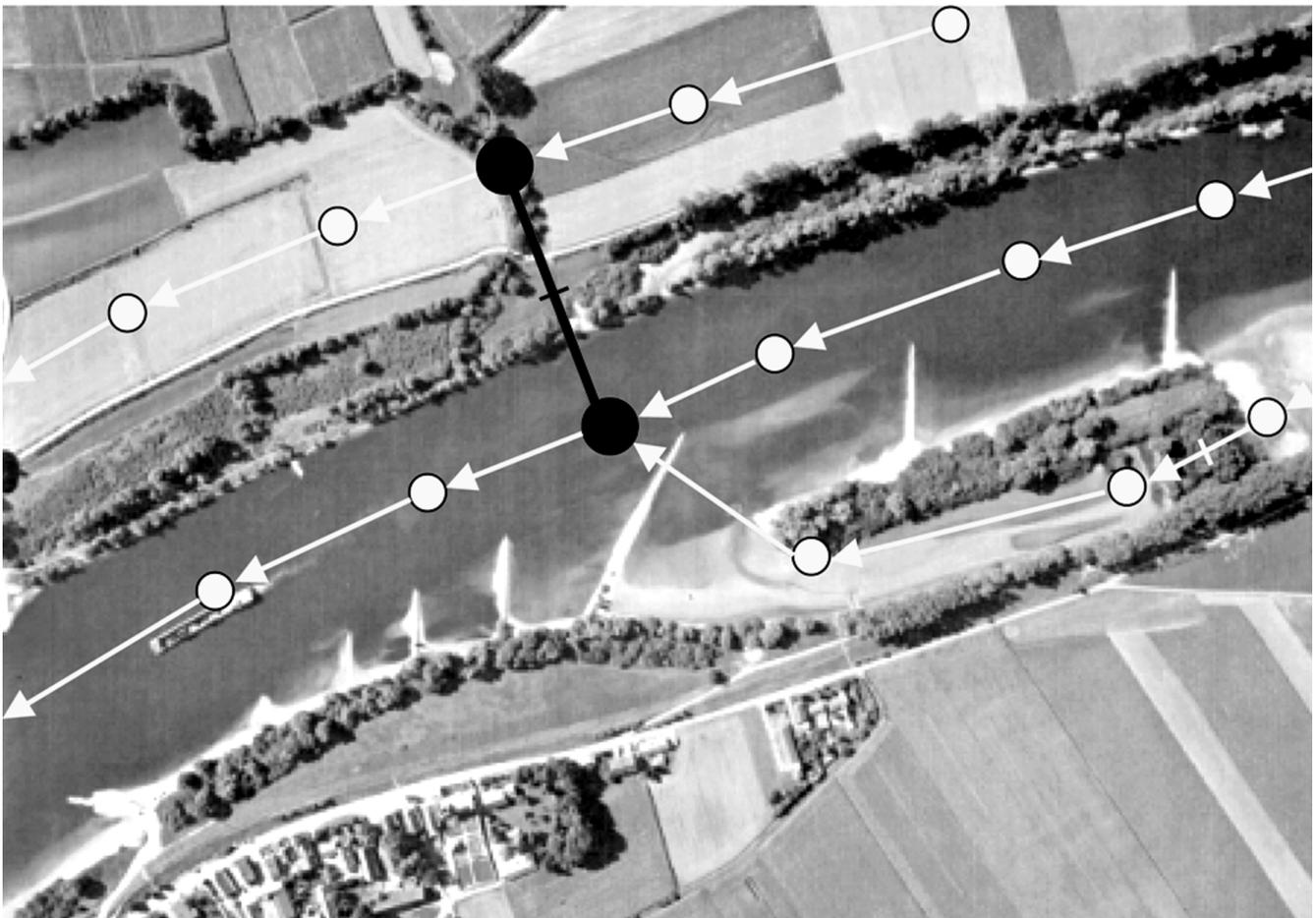


Bild 2: Auszug der Netztopologie bei Mariaposching, km 2297,7

simulieren, sind in regelmäßigen Abständen Querverbindungen vorgesehen. Auch am linken Ufer wird der Bereich hinter der Insel durch einen Strang modelliert.

Verbesserung der zu wählenden Parameter wurden in einem Forschungs- und Entwicklungsvorhaben dreidimensionale Berechnungen an einem schematisierten

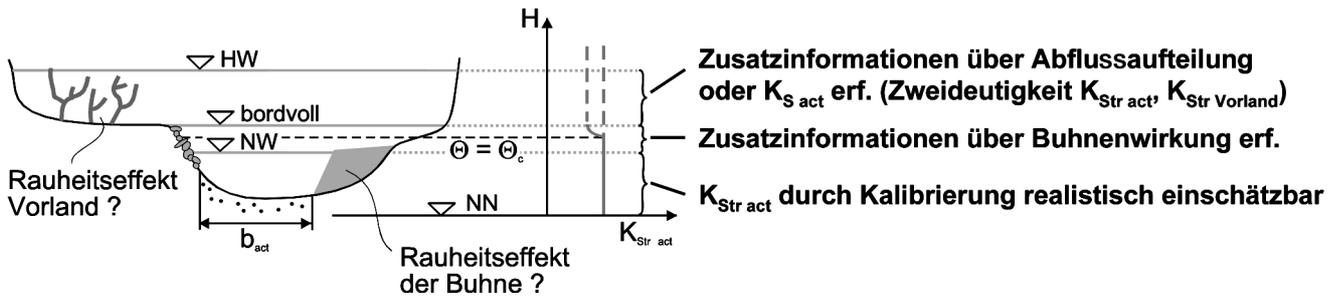


Bild 3: Schematische Darstellung fließtiefenabhängiger Rauheitsbeiwerte

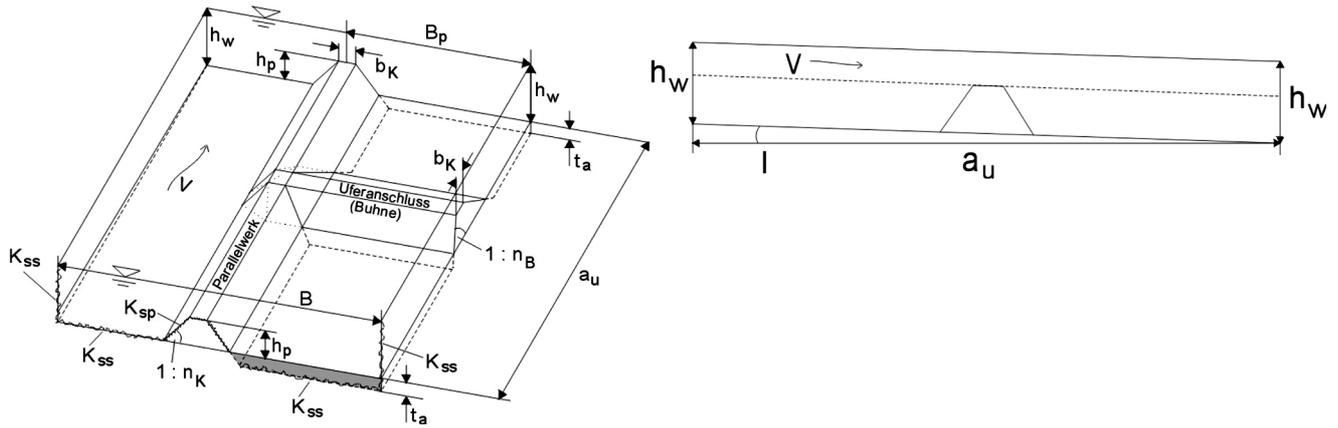


Bild 4: Schematische Darstellung der Gerinnegeometrie der dreidimensionalen HN-Modellierung zum Abflussverhalten von Buhnen bzw. Parallelwerken

Rechteckgerinne (Bild 4) durchgeführt. Die Dimensionen orientierten sich dabei an typischen Maßen der Donau. Dabei wurden verschiedene Parameter wie z.B. Fließtiefe, Buhnen- bzw. Parallelwerkshöhen und -abstände variiert und die Teilabflüsse im Hauptquerschnitt und Buhnen- bzw. Parallelwerksbereich bestimmt. Beispielhafte Darstellungen von Berechnungsergebnissen der Fließgeschwindigkeit in Längsrichtung an der Oberfläche sind in Bild 5 abgebildet. Vergleichsrechnungen mit dazu erstellten eindimensionalen Modellen lieferten verbesserte Schätzungen der verwendeten parametrisierten Ansätze.

Bei Hochwasserereignissen ist die Systemrauheit um das Vorland zu erweitern. Um die Prognosefähigkeit der Modelle zu gewährleisten, sind die oben genannten Einflüsse getrennt und gemäß ihrer physikalischen Ursachen möglichst genau zu erfassen. Da mit steigenden Wasserständen der Sedimenttransport in der Regel zunimmt, ist auch zunehmend ein Rauheitseinfluss durch Transportkörper zu erwarten. Da das System nun zwei Freiheitsgrade (Form- und Vorlandrauheit) besitzt, sind weitere Annahmen erforderlich. Zur Schätzung der Vorlandrauheiten dienten Luftbilder mit abgebildetem Bewuchs. Mit Hilfe von Rauheitstabellen (z.B. Ven Te Chow, 1959) wurde die Vorlandrauheit ermittelt. Die Formrauheit wurde mit empirischen Ansätzen berechnet (Söhngen et al. 1996). Die sich daraus ergebenden rechnerischen Wasserspiegellagen wurden mit gemessenen Hochwasserereignissen überprüft.

Der möglichst genauen Ermittlung des Abflusses einer Wasserspiegelfixierung kommt im Hinblick auf die Kalibrierung eine zentrale Rolle zu. Üblicherweise werden hierfür die Wasserstands-Abfluss-Beziehungen an den Hauptpegeln verwendet. Während der Pegel Hofkirchen, der für die Strecke unterstrom der Isarmündung der Hauptpegel ist, relativ gesicherte Ergebnisse bezüglich des Abflusses bis bordvollem Abfluss liefert, wird der Pegel Pfelling oberstrom der Isarmündung durch Rückstauwirkung von der Isarmündung beeinflusst. Diese Rückstauwirkung wird im wesentlichen durch den Abfluss aus der Isar und die aktuelle Form des Isarschüttkegels bestimmt. Ein Beispiel des rechnerischen Einflusses des Isarabflusses ist in Bild 6 dargestellt. Hierbei wurden bei gleichem Abfluss am Pegel Pfelling (1480 m<sup>3</sup>/s) zwei unterschiedliche Zuflüsse der Isar (100 m<sup>3</sup>/s und 500 m<sup>3</sup>/s) simuliert. Mit diesen Abflüssen bleiben Vorlandeinflüsse weitgehend ausgeschlossen. Durch den unterschiedlichen Abfluss unterstrom der Isarmündung ergeben sich somit um ca. 5 dm unterschiedliche Wasserstände an der Isarmündung. Die zwei gezeigten Vergleichsrechnungen zeigen um ca. 1 dm unterschiedliche Wasserstände am Pegel Pfelling. Die Abweichung beträgt in der Fließtiefe somit ca. 2 % im Abfluss ca. 4 %. Daraus resultieren Abweichungen der Rauheit (Strickler-Werte) von ca. 3 %. Da eine ungenaue Ermittlung des Abflusses auf der ganzen Teilstrecke oberstrom der Isarmündung zum Tragen kommt, kann damit die Kalibrierung und damit auch die Prognosefähigkeit auf der ganzen Teilstrecke wesentlich davon beeinflusst werden. Eine Korrektur mittels des

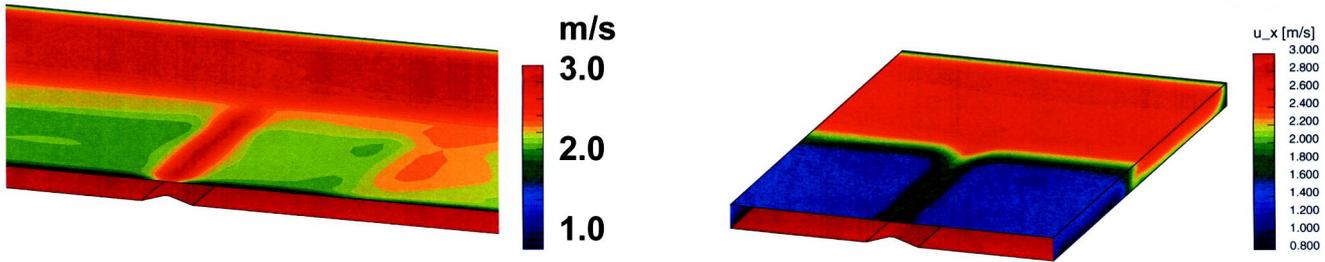


Bild 5: Beispielhafte Darstellung berechneter Strömungsgeschwindigkeiten in Hauptfließrichtung der dreidimensionalen HN-Modellierung zum Abflussverhalten von Buhnen bzw. Parallelwerken

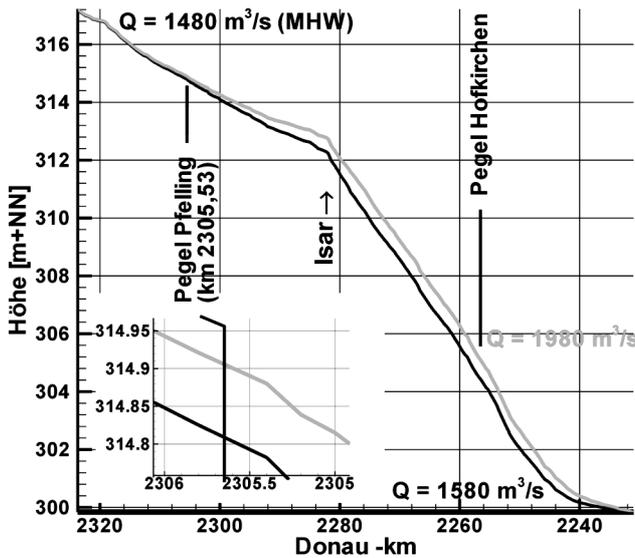


Bild 6: Rechnerischer Einfluss des Abflusses der Isar auf die Wasserstände am Pegel Pfelling/Donau

Pegels im Unterwasser der Staustufe Pielweichs in der Isar ist für den betreffenden Zeitraum nicht möglich, da starke morphologische Änderungen im Bereich des Pegels auf Grund der Errichtung der Staustufe Pielweichs keine eindeutige Wasserstands-Abfluss-Beziehung erlauben. Zur Kontrolle der Abflüsse am Pegel Pfelling wurden weitere Pegel der Donau oberstrom der Isar bis Schwabelweis zum Vergleich herangezogen. Die Zuflüsse der Isar mussten als Differenzen zwischen den Pegeln Hofkirchen und Pfelling gebildet werden.

Durch unterschiedliche hydrologische Randbedingungen im Einzugsgebiet von Donau und Isar treten häufig Hochwasserereignisse nicht in beiden Gewässern gleichzeitig auf. Typische Hochwasserereignisse treten an der Donau im Frühjahr, an der Isar im Frühsommer auf. Bei dem häufiger auftretenden Hochwasser in der Zeit um den Jahreswechsel sind die Isarwasserstände in der Regel durch Frost im Bereich der Alpen niedrig. So können Hochwasserabfluss der Donau und Niedrigwasserabfluss der Isar zusammenfallen. In Bild 7 sind schematisch zwei rechnerische Hochwassersituationen dargestellt. Die Strömungspfeile in rot geben die Strömungsrichtung bei einem gleichzeitig auftretenden Do-

nau- und Isarhochwasser an. Deutlich ist die der Donau zugewandte Strömungsrichtung zu erkennen. Im Falle eines Niedrigwassers aus der Isar bei einem Hochwasser aus der Donau (grüne Strömungspfeile) kann durch Rückstauwirkung in die Isar dort der Wasserspiegel höher als die Ufer sein. Dieser Effekt kann ein bis zwei Kilometer in die Isar hineinreichen. Durch vergleichsweise niedrigen Wasserspiegel auf dem rechten Vorland unterstrom der Isarmündung, der Wasserstand wird hier im Wesentlichen durch den Staatshaufen kontrolliert, entsteht ein Gefälle, das von der Donau in die untere Isar weist. Somit fließt ein Teil des Donauabflusses in die untere Isar hinein und von dort zusammen mit dem Isarabfluss in das rechte Vorland. Durch Simulation am physikalischen Modell der unteren Isar sowie durch zwei Abflussmessungen während des Hochwassers vom November 1998 konnte dieses Verhalten bestätigt werden.

Der Bereich des Isarschüttkegels ist morphologisch die Kontrollstelle des Untersuchungsgebiets und unterliegt in Folge der bereits beschriebenen unterschiedlichen hydrologischen Verhältnisse starken Veränderungen in Größe und Gestalt. Im Frühjahr bei den Donauhochwasserereignissen wird ein Teil des Schüttkegels abgetragen, im Frühsommer bei den Hochwasserereignissen der Isar wird er durch Geschiebeeinträge wieder aufgebaut. Um Abweichungen in den Berechnungen der Wasserspiegellagen zu minimieren wurden aus den zu Verfügung stehenden Querprofilpeilungen des Isarschüttkegels (Söhngen et al., 1992) ein gemittelter Zustand hergestellt, mit dem die Kalibrierung durchgeführt wurde.

Die Ergebnisse der Kalibrierung sind in Bild 8 dargestellt. Es zeigt die berechneten und gemessenen Wasserspiegel auf der Basis des Modells mit Peilzustand 1990. Zum Vergleich wurde zusätzlich noch der berechnete Wasserspiegel des  $HQ_{100}$  eingetragen. Abweichungen der berechneten von gemessenen Werten lassen sich im wesentlichen durch morphologische Veränderungen insbesondere im Bereich der Isarmündung erklären. Dies hat eine direkte Auswirkung auf die Wasserspiegellagen des Bereichs der Donau oberstrom der Isarmündung. Durch die Verwendung gemittelter Querprofile im Bereich des Schüttkegels liegen einige der berechneten Wasserspiegel zu hoch, während andere

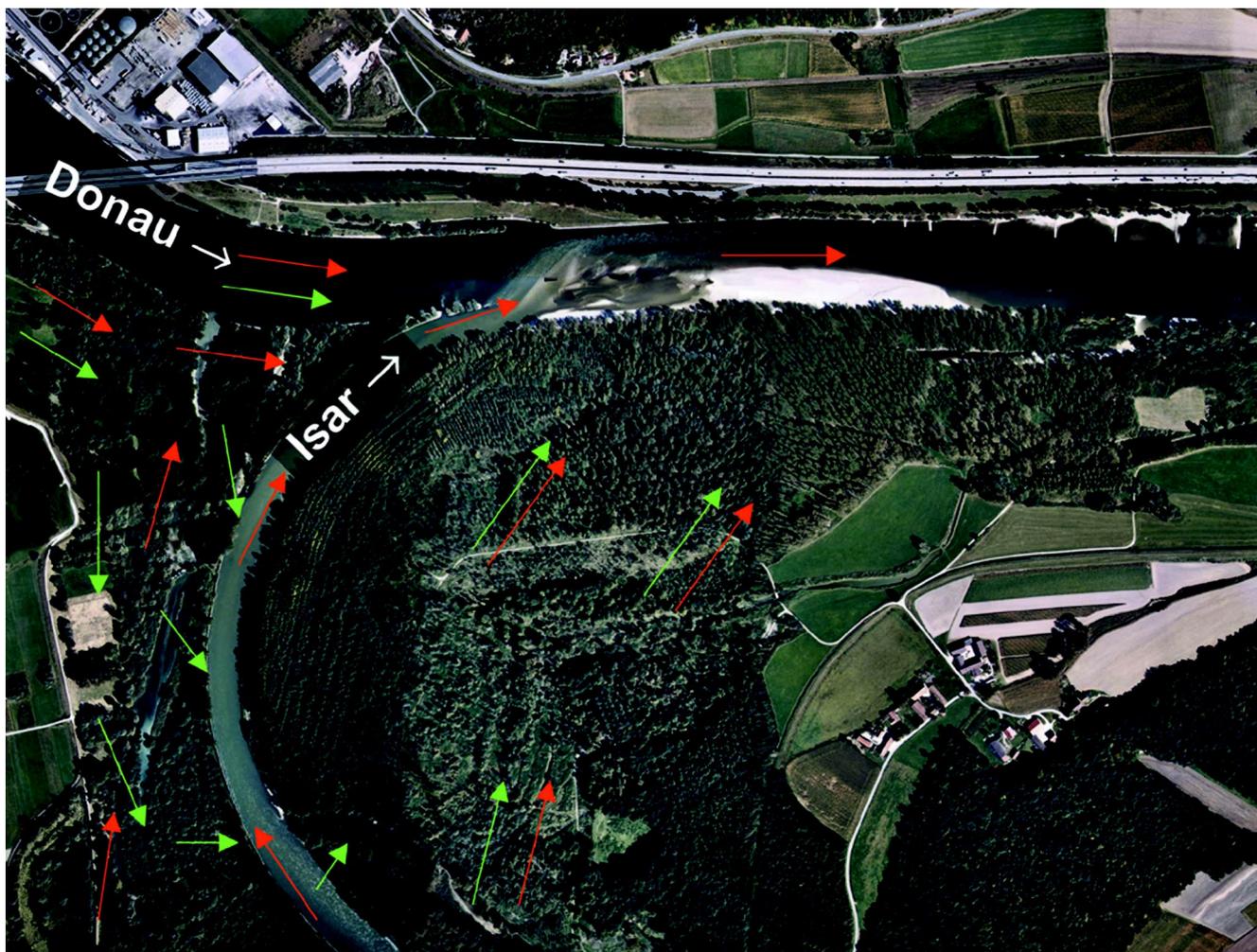


Bild 7: Rechnerische Strömungsverhältnisse an der Isarmündung bei unterschiedlichen Hochwasserereignissen

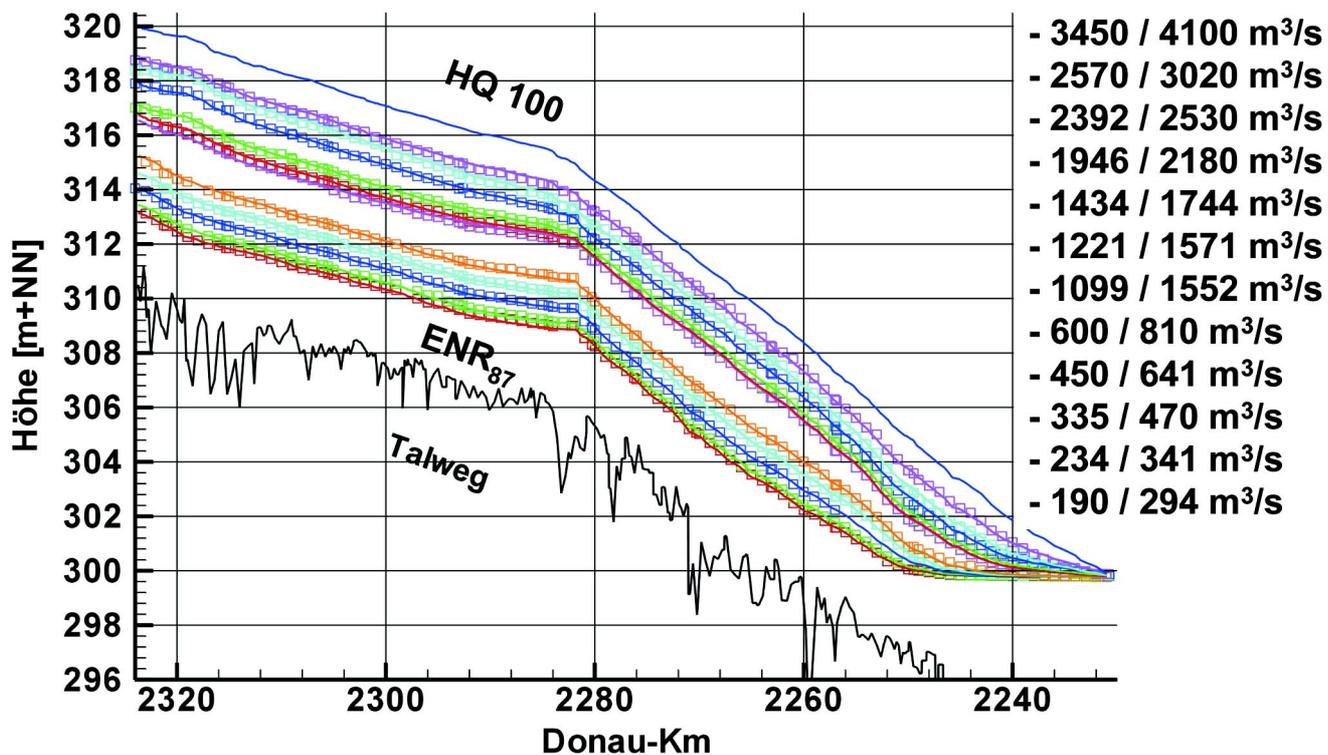


Bild 8: Ergebnisse der Kalibrierung: Wasserspiegellagen, Modell 1990

zu niedrig sind. Durch die kleinen Gefälle bleiben Abweichungen relativ weit nach oberstrom erhalten. Bei gesonderten Berechnungen der Teilstrecke oberstrom der Isarmündung zeigen sich nur geringe Abweichungen, da an dieser Stelle der gemessene Wert als Randbedingung vorgegeben wird.

verteilung über dem Querschnitt im Wesentlichen von der Fließtiefe gesteuert wird. In Bereichen mit Quersimpulseinträgen bzw. Sekundärströmungen z.B. aus Krümmungen können nur grob angenäherte Aussagen über die Fließgeschwindigkeitsverteilung gemacht werden. Da die beiden Beispiele dem vorgennannten Kriteri-

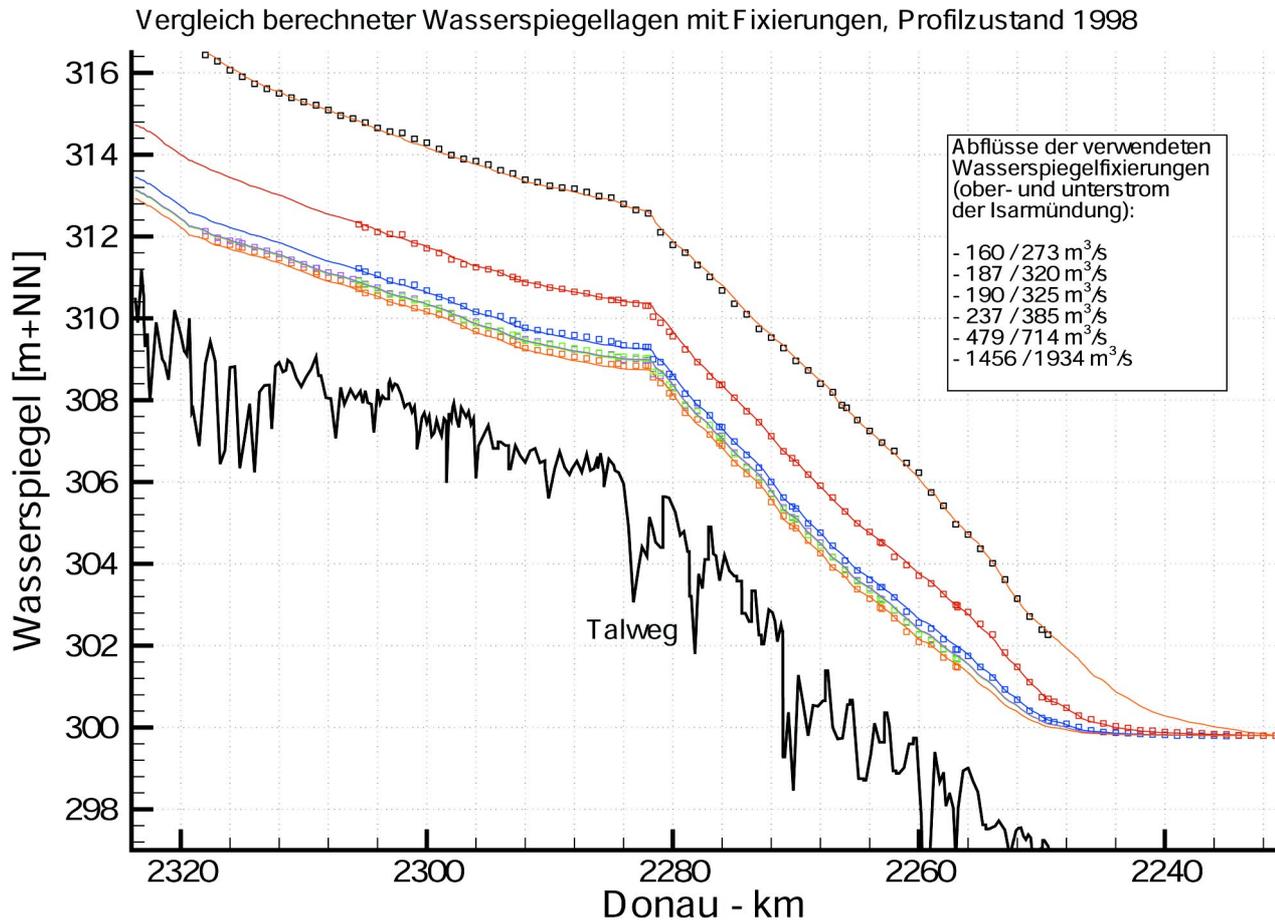


Bild 9: Ergebnisse der Verifizierung: Wasserspiegellagen, Modell 1998

In Bild 9 ist ein direkter Vergleich der mit dem Modell der Peilung 1998 prognostisch, also ohne weitere Anpassung der Reibungsbeiwerte, gerechneten Wasserspiegellagen dargestellt. Durch die gute Übereinstimmung wird die Prognosefähigkeit des Modells bestätigt. Weiterhin wurden vorliegende Geschwindigkeitsmessungen, die bei dem Hochwasser im November 1998 ermittelt wurden, bezüglich des Abflusses im Hauptquerschnitt ausgewertet und mit berechneten Abflüssen verglichen. Dabei ergab sich eine mittlere Abweichung der Abflüsse im Hauptquerschnitt von ca. 1% bei einer Standardabweichung von ca. 6%. Darüber hinaus sind auch direkt die Geschwindigkeitsverteilungen verglichen worden. In Bild 10 sind beispielhaft die berechneten und am 03.11.1998 gemessenen Geschwindigkeitsprofile dargestellt. Hierzu wurde mit dem berechneten Reibungsgefälle die Fließgeschwindigkeiten an den gleichen Stellen des Hauptgerinnes ermittelt, an denen auch die Messungen ausgewertet wurden. Dieser direkte Vergleich der Geschwindigkeitsverteilungen kann nur dann zu guten Übereinstimmungen führen, wenn die Abfluss-

um genügen, zeigen sie eine gute Approximation der Geschwindigkeits- und somit auch der Abflussaufteilung. Auch die bei Donau-km 2280,3 durchgeführten Messungen im Bühnenfeld und im Vorland bei km 2286,5 zeigen gute Übereinstimmungen mit der Berechnung, die die Modellierung bestätigen.

### Modellerstellung der Planungsvarianten

In den bereits vorgestellten Planungsvarianten soll für schiffahrtsrelevante Wasserstände zur Erreichung gleichmäßiger, größerer Fließtiefen im Bereich der Fahrrinne u.a. das Regelungskonzept angepasst bzw. erweitert werden. Daher folgte die BAW für die Planungsvariante A und in den freifließenden Abschnitten der Variante C der von Kuhn formulierten Grundsätzen: „Die Niedrigwasserregelung strebt eine Linienführung und eine Querschnittsgeometrie der Art an, dass der Fluss mit Hilfe des strömenden Wassers sich sein Bett selbst



**Messquerschnitt km 2280.3; 1848 m<sup>3</sup>/s**  
**Luftbilder aus NW-Befliegung 1997**

**Messquerschnitt km 2286.5; 1924 m<sup>3</sup>/s**

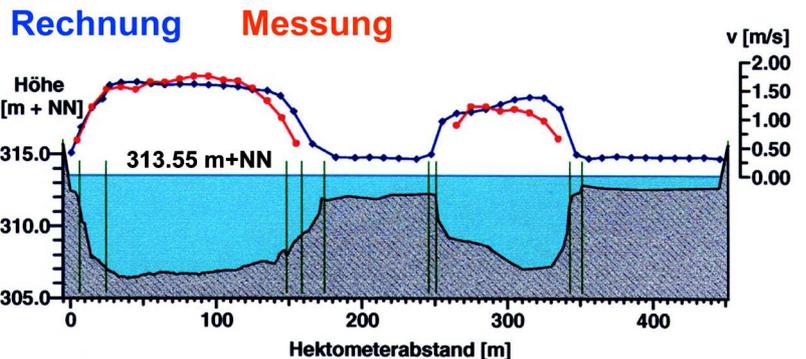
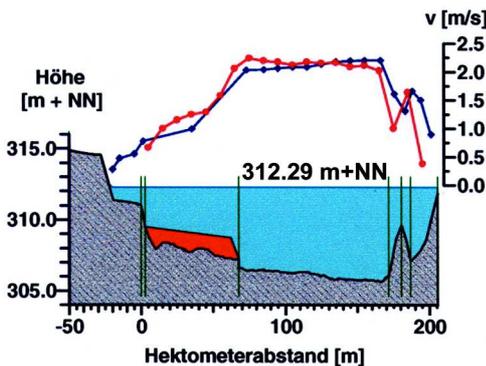


Bild 10: Ergebnisse der Auswertung der Geschwindigkeitsmessung vom 03.11.1998 im Vergleich mit dem eindimensionalen HN-Modell der Peilung 1998

umbildet und das benötigte Fahrwasser schafft. Damit wird das Flussbett als natürlich gewachsenes Gebilde stabiler als eine künstlich aufgezwängte Form“ (in Bretschneider et al. (Hrg.), 1993). Somit sind, im Sinne eines morphologisch stabilen Regelungskonzeptes, Sohlhöhenänderungen auf Grund von Baumaßnahmen zu berücksichtigen. Da die morphologischen Änderungen mit den eingesetzten Untersuchungsmethoden nur angenähert ermittelt werden können, sind die Ergebnisse im Sinne der erreichbaren Fahrrinntiefe, nicht aber im Sinne einer abgeschlossenen Planung zu interpretieren.

Daraus ergibt sich, dass, wie Kuhn weiter schreibt, „die Niedrigwasserregulierung nicht eine einmalige, kurze Baumaßnahme ist, sondern sich über einen längeren Zeitraum erstreckt“.

In Bild 11 ist ein Ausschnitt am Beispiel eines möglichen erweiterten Regelungskonzeptes zur Variante A dargestellt. Die zu ergreifenden Maßnahmen zur Änderung des Regelungskonzeptes umfassen folgende Möglichkeiten:

- Anpassung bestehender Buhnen und Parallelwerke,
- Neubau von Buhnen und Parallelwerken,
- Ufervorschüttungen bzw. Kiesbankaufhöhungen,
- Kolkverbau und
- Fahrrinnenverlegungen zur besseren schiffahrtlichen Ausnutzung der Querschnitte nach Einbau von Regelungsmaßnahmen.

Mit Ausnahme der Fahrrinnenverlegungen haben alle anderen Methoden durch Änderung der hydraulischen Kenngrößen der Fließtiefe und Reibungsgefälle einen Einfluss auf die Flussmorphologie. Die Ermittlung morphologischer Änderungen in den Modelluntersuchungen werden unter Verwendung der folgenden Annahmen durchgeführt:

- Die Korngrößen werden durch die Veränderungen nicht wesentlich beeinflusst, da durch die Schifffahrt bei Niedrigwasserverhältnissen eine mögliche natürliche Abpflasterung der Sohle wieder aufreißen kann,
- die Wasserspiegel bleiben nahezu unverändert,
- die Gefälleverhältnisse ändern sich nicht signifikant,
- die örtliche, rechnerische Jahresgeschiebefrachtkapazität basiert auf der langjährigen Dauerlinie und muss auch für den künftigen Zustand erhalten bleiben,
- die rechnerische Jahresgeschiebefracht basiert auf dem Zustand der Peilung 1998 und ist durch heutige Baggerungen beeinflusst,
- morphologische Sohlhöhenänderungen können durch Parallelverschiebung der Sohle im transportwirksamen Bereich approximiert werden (eindimensionale Betrachtung).
- Sohlsicherungsmaßnahmen erfolgen, mit Ausnahme von Kolkabdeckungen, durch Geschiebemanagement.

Daraus ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Die Rauheitsbeiwerte bleiben unverändert,

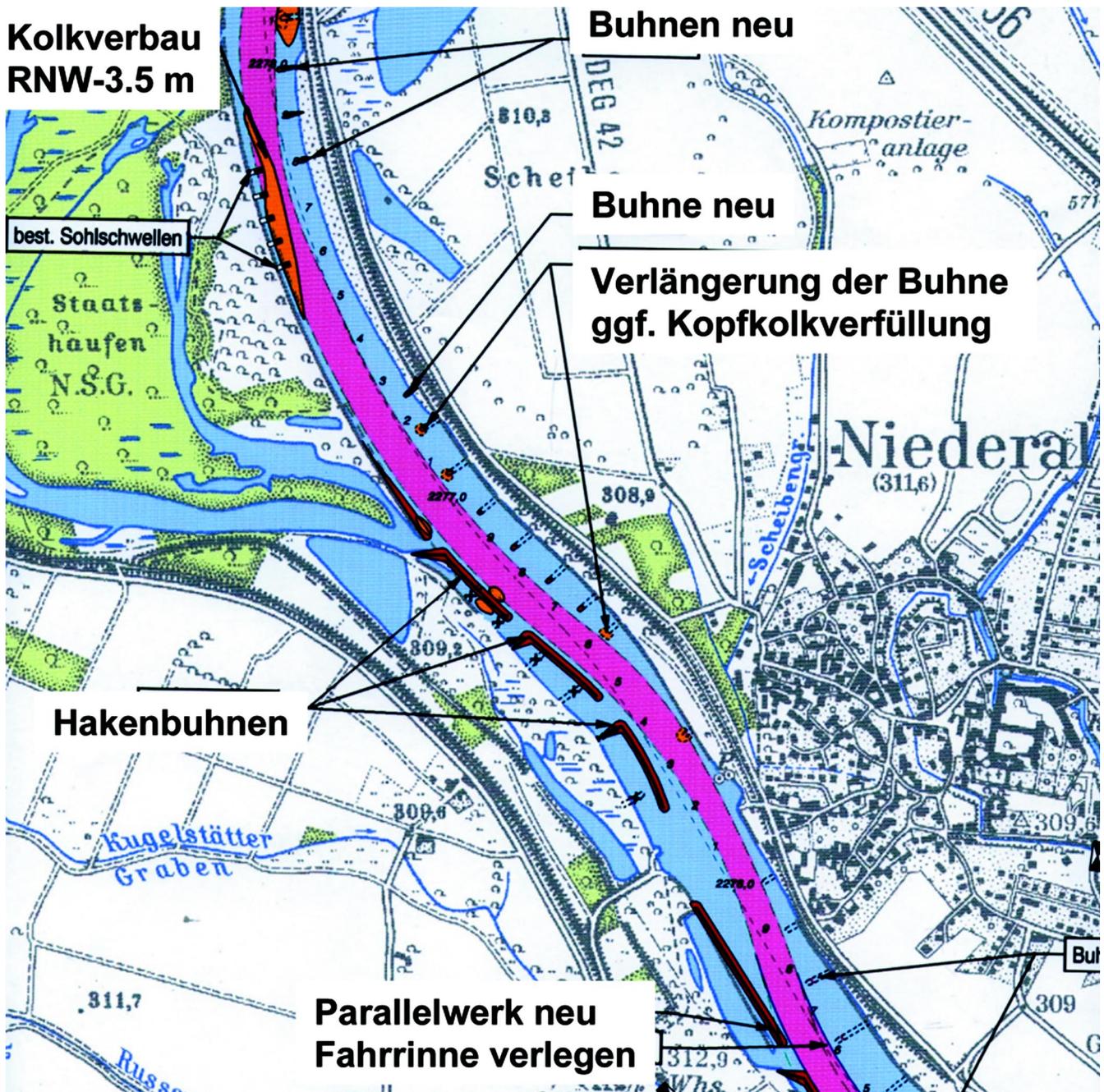


Bild 11: Lageplan eines Abschnitts möglicher Regulationsmaßnahmen, Variante A

- die für die morphologischen Verhältnisse des IST-Zustandes angepasste Transportgleichung bleibt erhalten,
- die durch die Modifikation an den Regulationselementen hervorgerufene Veränderung der Jahresgeschiebefracht wird nur durch Sohlhöhenänderung auf das Maß des Ausgangszustandes 1998 gebracht,
- die Anpassung der Sohlhöhenänderung erfolgt lokal, es wird angenommen, dass benachbarte Modellquerprofile nicht beeinflusst werden,
- bisherige Unterhaltungsmaßnahmen des Modellzustandes 1998 sind auch in Ausbauvarianten zur Erhaltung der Querprofilform erforderlich.

Die Ermittlung der resultierenden Sohlintiefe ist durch die vergleichende Betrachtung vor dem Hintergrund der erforderlichen Untersuchungstiefe einer politischen Richtungsentscheidung ausreichend genau.

Die eingesetzten Modellverfahren erlauben keine „morphodynamische“, also instationäre Beschreibung der morphologische Veränderungen, sondern nur „morphostatische“, die den Endzustand der Veränderungen bei gegebener Jahresgeschiebefracht und Wasserstände beschreibt. Analog zu morphodynamischen Modellen werden in morphostatischen Modellen die Sohlveränderungen in einer parallelen Sohlabsenkung im Bereich des morphologisch aktiven Betts berücksichtigt. Wesentliche Annahme ist, dass sich die Donau des Ausgangs-

zustandes im morphologischen Gleichgewicht befand und für einen stabilen Zustand in Zukunft sich im lang-jährigen Mittel wieder die gleiche rechnerische, auf der Basis des Modells mit dem Peilzustand 1998 ermittelte Jahresgeschiebefracht einstellen wird. Eine Beispielrechnung dieser Vorgehensweise anhand realer Verhältnisse zeigt Bild 12. Durch einen Neubau einer Buhne am linken Ufer ergeben sich höhere Fließgeschwindigkeiten. Daraus resultieren größere Sohlschubspannungen die durch eine Sohleintiefung von rd. 4 dm kompensiert wird. Diese Sohleintiefung (gelbe Fläche) wirkt auf die gesamte Breite des morphologisch aktiven Bereichs.

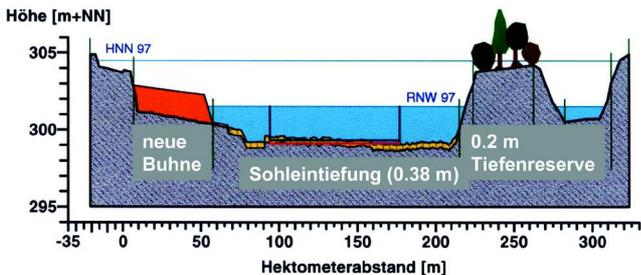


Bild 12: Morphologische Wirkung durch Regelungsmaßnahmen am Beispiel einer Buhne

Eine allgemeine morphologische Zustandsbeschreibung der Donau wurde bereits im Rahmen des Raumordnungsverfahrens erarbeitet. Umfangreiche Sohlhebungen lieferten Datenmaterial für Kornverteilungen und Geschiebetransport (Söhngen et al., 1992), die durch fortlaufende Datenerhebungen ergänzt wurden. Diese Informationen wurden für die morphologische Kalibrierung verwendet. Die Berechnung des Geschiebetransportes wurde auf der Basis der in der BAW für die Donau ermittelte Transportgleichung ermittelt (Söhngen et al., 1996). Die auf dieser Basis mit dem Ausgangszustand 1998 berechnete mittlere Jahresgeschiebefracht wird durch Massenbilanzen bestätigt.

Die Erstellung der Planungsvarianten erfolgt in zwei (IST-Zustand 2000 und Variante A) bzw. drei Schritten (Variante C). In einem ersten Schritt werden die geplanten Regelungselemente in den Modellen verändert bzw. neu eingebaut und deren morphologische Wirkung ermittelt.

Da durch die Staustufe der Variante C ein mit fluss-regulierenden Maßnahmen gestützter Wasserspiegel für schiffahrtliche Belange im Bereich Isarmündung – Staustufe voraussichtlich nicht erforderlich sein wird, kann durch Reduktion der Zugabemengen eine kontrollierte Sohleintiefung und, damit verbunden, größere Fließ-tiefen erreicht werden. Diese Maßnahme wirkt auf alle Querschnitte des Hauptquerschnitts. In einem letzten Schritt wird dann für alle Varianten die mögliche Fließ-tiefe im Bereich der Fahrrinne durch zusätzliche Unterhaltungsmaßnahmen hergestellt. Die Herstellung der Planungsvarianten erfolgt unter der Randbedingung begrenzter Wasserspiegeländerungen. Diese Randbedingung soll die ökologischen Folgen begrenzen und die Hochwasserneutralität gewährleisten.

Prinzipiell können durch geeignete Dimensionierung von Regelungsbauwerken die Unterhaltungsmaßnahmen reduziert werden. Eine solche Dimensionierung ist jedoch mit eindimensionaler Modelltechnik nicht genau genug möglich, da hier u.a. der morphologische Einfluss der Strömung auf die Querprofilform nicht berücksichtigt werden kann. Die gewählte Vorgehensweise ist hinsichtlich der späteren Ermittlung der Kosten für Unterhaltungsmaßnahmen auf der sicheren Seite.

Bild 13 beschreibt die Ermittlung der Sohlhöhenänderungen im Falle von Kolkverbaumaßnahmen. Bei einer Erosion in den anstehenden Tertiär wird durch einen Kolkverbau der Kolk abgedeckt und mit einem Deckwerk gesichert. In Folge der verbauten Fläche und der erhöhten Rauheit im Bereich des Kolkverbaus ist eine Erosion der Kiesbank zu erwarten. Um das Maß dieser Veränderung abzuschätzen, wurde in einer Parameterstudie mit eindimensionalen Modellansätzen das Reibungsgefälle, die transportwirksame Sohlschubspannung und die Erosionstiefe mit mehreren unterschiedlichen Ansätzen berechnet und die Ergebnisse miteinander verglichen. Ein wesentliches Ergebnis zeigte, dass die Sohlschubspannungen einen wesentlichen Einfluss auf die sich einstellenden Sohlhöhenänderungen haben. So kann in Bereichen mit kleinen Sohlschubspannungen die Erosionsfläche Null sein, in Bereichen mit großen Sohlschubspannungen kann die sich einstellende Erosionsfläche größer als die Verbaufäche sein. Im ersten Fall ist eine wasserstandsstützende Wirkung vorhanden,

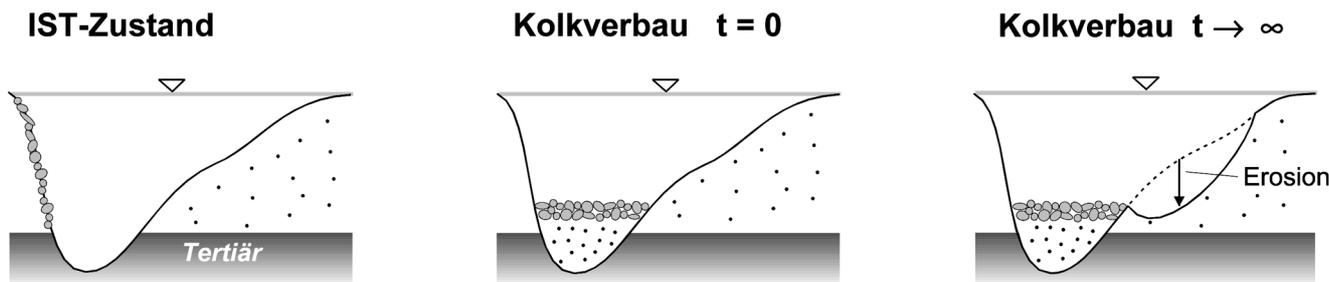


Bild 13: Prinzipskizze zur Wirkung von Kolkverbaumaßnahmen

im zweiten Fall kann der Wasserspiegel sogar verfallen. Mit dieser Methode wurde für jeden Kolkverbau die zugehörige Kiesbankeintiefung abgeschätzt. Dabei bewegte sich das Verhältnis von erodierter Fläche zu verbauter Fläche im Bereich zwischen 0 und 2. Der Faktor 0 bedeutet hierbei, dass keine Erosionsfläche zu erwarten ist, der Faktor 2 bedeutet eine doppelt so große Erosionsfläche wie Verbaufäche. Ein Beispiel einer Modellrechnung und deren Umsetzung zeigt Bild 14.

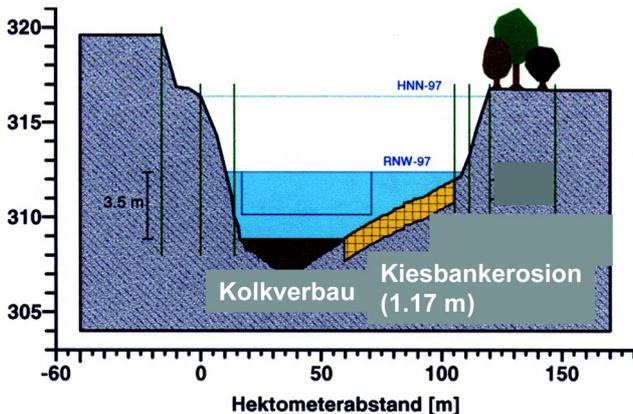


Bild 14: Morphologische Wirkung durch Regelungsmaßnahmen am Beispiel eines Kolkverbauwerks

Die in dem letzten Schritt durchgeführten zusätzlichen Unterhaltungsmaßnahmen werden modellseitig durch Baggerungen berücksichtigt. Nach üblicher Unterhaltungspraxis wird die Sohle bei erforderlichen Baggermaßnahmen zur Berücksichtigung von Ungenauigkeiten der Baggerung sowie einer Gewährleistung des Sollmaßes der Fahrrinntentiefe lokal ca. 2 dm tiefer hergestellt. Unter der Annahme, dass erst wieder im Rahmen der Unterhaltungsbaggerungen die Fahrrinne erneut gebaggert wird, wenn die Anlandungen das Fahrrinnenniveau erreicht haben, wird zur Herstellung der Modellquerschnitte von einem zeitlichen Mittelwert von 1 dm ausgegangen.

Zur Abschätzung der künftigen Baggermaßnahmen ist zwischen der einmaligen Ersterstellung und der laufend anfallenden Unterhaltung zu unterscheiden. Nach Durchführung der Berechnungen zu den morphologischen Wirkungen, die die Sohle befindet sich derzeit in einem angenäherten Gleichgewichtszustand, werden im Rahmen der Herstellung der möglichen Fahrrinntentiefe weitere Baggermaßnahmen durchgeführt. Da diese Baggermengen nur einmal zu Beginn der Ausbaumaßnahmen anfallen, wird das dabei zu baggernde Volumen als Ersterstellungsvolumen bezeichnet. Die weiterhin jährlich anfallenden Baggermaßnahmen zur Unterhaltung der Fahrrinne sind von der örtlichen morphologischen Aktivität und von der Abweichung der mittleren Sohle nach Baggerung im Vergleich zur mittleren Sohle vor der Baggerung abhängig. Im Falle kleinerer Sohlhöhenänderungen können diese Größen als Maß für den

Unterhaltungsaufwand verwendet werden. Da der IST-Zustand 2000 als Fortführung des derzeitigen Zustandes zu verstehen ist, ist die mittlere Sohlhöhenänderung des IST-Zustands 2000 vor und nach Baggerungen als Maßstab für die Planungsvarianten A und C anzusetzen. Dabei sind die Bereiche ober- und unterstrom der Isarmündung, auf Grund unterschiedlicher morphologischer Aktivität, getrennt zu berücksichtigen. Da die Geschiebefrachten der Variante C künftig geringer sein werden, können, auf Grund der geringeren Jahresgeschiebefracht, die sich durch Baggermaßnahmen ergebenden mittleren Sohlhöhenänderungen um das entsprechende Maß vergrößert werden.

Da in allen Modellen der Kalibrierung die Vertiefung auf 2,0 m im Bereich Straubing bis Deggendorf noch nicht vorhanden bzw. auf Grund der erhöhten morphologischen Aktivität durch die Vertiefungsmaßnahmen noch nicht voll hergestellt werden konnte sowie die derzeit durchgeführten Baumaßnahmen zum Bürgerfeldausbau nicht berücksichtigt wurden, sind die genannten Modelle nicht als Vergleichszustand für Relativbetrachtungen der Ausbauvarianten geeignet. Der IST-Zustand 2000 wird als Vergleichszustand für Relativbetrachtungen verwendet. Er umfasst auf der Basis des Modells der Peilung 1998 den Bürgerfeldausbau die volle Herstellung der Fahrrinntentiefe von mindestens 2 m auf der gesamten Breite der Fahrrinne, die Abdeckung des Tertiärs in Krümmungskolken, die nach derzeitigem Wissensstand bereits in den Tertiär erodiert sind bzw. ein Sohldurchschlag befürchtet werden muss, auf ein Niveau von 1 m über dem Tertiär bei mindestens 3,5 m Wassertiefe unter RNW sowie die Ertüchtigung von Buhnen, deren Sollhöhe deutlich unterschritten ist.

In Teilbereichen muss auf Grund von Ausbaumaßnahmen die Vernetzung des HN-Modells an die künftigen Gegebenheiten angepaßt werden. Deshalb ist vor Erstellung des Ausbauzustandes auf Basis des Zustandes der Peilung 1998 der Nachweis der Prognosefähigkeit geführt worden. Dazu mußte die sich die nach Veränderung der Vernetzung bei Übernahme der in der übrigen Strecke gewählten Parameter von z.B. Parallelwerken und der vorhandenen Rauheiten, vergleichbare Wasserspiegellagen für den gesamten Abflussbereich einstellen. In Bild 15 ist eine solche Änderung der Vernetzung dargestellt. Im Bild links ist der Zustand des Modells von 1998 dargestellt. Durch ein weiteres künftiges Parallelwerk bei km 2305.8 wurde die Netztopologie dahingehend verändert, einen eigenen Strang über das bestehende und das künftige Parallelwerk (Bild 15, rechts rot dargestellt) zu legen. Die Vergleichsrechnungen zwischen den Modellen des IST-Zustand 2000 mit alter und neuer Netztopologie ohne Errichtung des neuen Parallelwerks zeigt bei RNW vernachlässigbare Abweichungen bei MW, MHW und HQ 100 betragen die maximalen Abweichungen 2 cm.

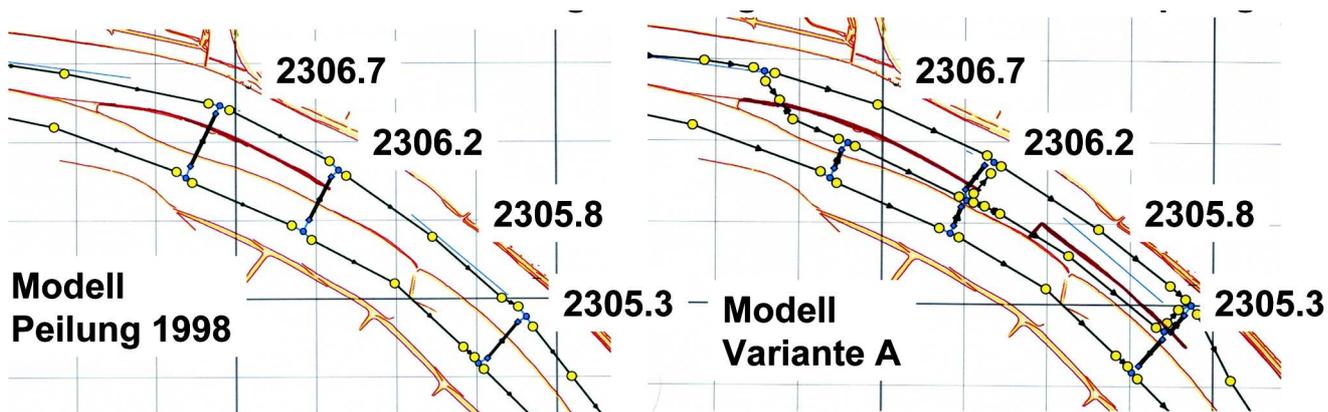


Bild 15: Lageplan der Netztopologieänderung zwischen Modell Peilung 1998 und Variante A

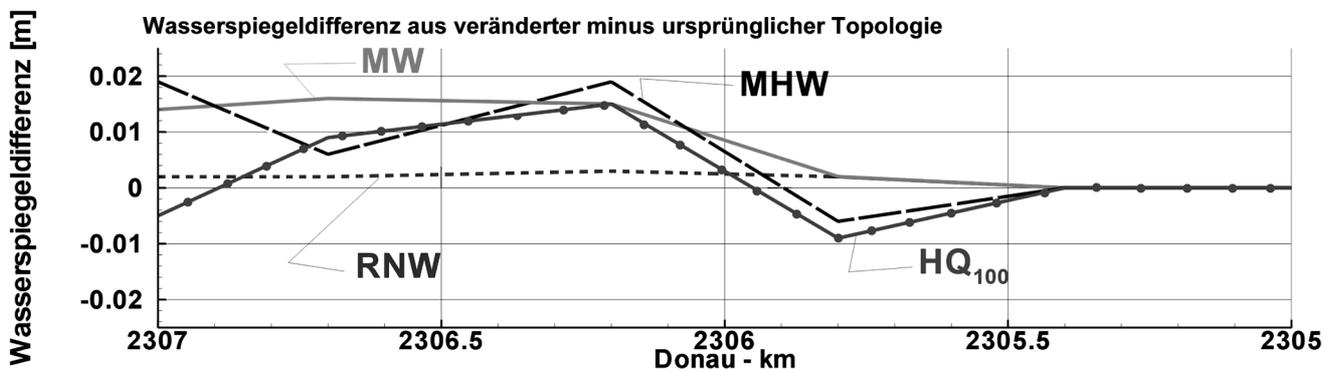


Bild 16: Ergebnisse der Berechnung von Wasserspiegellagen zum Vergleich der Wirkung einer Netztopologieänderung

### Schlussfolgerungen

Das Untersuchungsgebiet weist komplexe Zusammenhänge der Strömungsverhältnisse und Morphologie auf. Um zu fundierten Aussagen künftig erreichbarer Schifffahrtsverhältnisse sowie ökologischen Randbedingungen zu gelangen, ist es erforderlich, diese Phänomene möglichst sorgfältig zu erfassen. In der Kalibrierungsphase zeigte sich, dass mehr Modelle und die Berücksichtigung möglichst vieler Naturdaten erforderlich waren, um eine tragfähige Basis zur Erstellung der Planungsvarianten zu erhalten.

Zur Berechnung künftiger Wasserspiegellagen wird häufig die Wasserspiegel stützende Wirkung von Regelungsmaßnahmen überschätzt, da keine Sohlveränderungen berücksichtigt werden. Dass dennoch solche Maßnahmen in Sinne der Verbesserung der Schifffahrtsverhältnisse dienlich sind, liegt an der sich vergrößern- den Fließtiefe auf Grund von Erosionserscheinungen. Die Ermittlung der künftigen Zustände ist mit den für diese Untersuchung eingesetzten Instrumentarien nur grob zu erfassen. Durch eine vergleichende Betrachtung kann für eine politische Richtungsentscheidung eine ausreichende Aussageschärfe erzielt werden. Im Falle einer Umsetzung von Regelungsmaßnahmen ist immer eine erhöhte Aufmerksamkeit durch den Betreiber der Wasserstraße erforderlich.

## Literatur

Bretschneider, H.; Lecher, K.; Schmidt, M. (Hrsg.): Taschenbuch der Wasserwirtschaft, 7. Auflage, Parey Verlag, Hamburg, 1993

Kellermann, J.; Söhngen, B.: Hydraulische, sedimentologische und schiffahrtliche Aspekte einer Regelungsvariante für den Donauausbau Straubing – Isarmündung, XIX IHP-UNESCO Konferenz der Donauländer, Osijek, Kroatien, 15. bis 19.06.1998

Ritzert, F.; Söhngen, B.; Nestmann, F.: Niedrigwasser-aufhöhende Wirkung von Buhnen bei fester Sohle, 51. HTG-Jahrbuch, Hansa-Verlag, Hamburg, 1998

Roßbach, B.; Kauppert, K.: Physikalischer Modellversuch Isarmündung, Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 80, Dezember 1999

Söhngen, B.: Fahrdynamische Modellrechnungen, Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 80, Dezember 1999

Söhngen, B.; Kellermann, J.: 1-D-morphodynamische Modellierung großer Flussstrecken, 36. Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium, Technische Hochschule Darmstadt, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, 17. und 18.10.1996

Söhngen, B.; Kellermann, J.; Loy, G.: Modeling of the Danube and Isar Rivers Morphological Evolution, Part I; Measurements and Formulation, 5<sup>th</sup> International Symposium on River Sedimentation, Karlsruhe 1992

Söhngen, B.: Naturmessungen zur Systemrauheit in Flüssen mit Deckschichtbildung, Seminar des österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes, Innsbruck, 20.10.1995

Ven Te Chow: Open Channel Hydraulics, McGraw Hill, New York, 1959

Witte, H-H.; Söhngen, B.; Kellermann, J.: Donauausbau zwischen Straubing und Isarmündung, Zeitschrift für Binnenschifffahrt, Nr. 3, Februar 1997

