

Zusammenfassung zur Morphologie

Das Bayer. Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie (StMWVT) hat seit 1998 vom Ingenieurbüro Hunziker & Zarn die Morphologie der Donau zwischen Straubing und Vilshofen untersuchen lassen, dabei wurden die folgenden Gutachten erstattet:

1. Donau - Beurteilung der morphologischen Entwicklung zwischen Straubing und Vilshofen, Aarau, im Februar 1999;
2. Donau - Ergänzende Untersuchungen zur Erosionsproblematik zwischen Straubing und Vilshofen, Aarau im Februar 2000;
3. Donau - Untersuchung der morphologischen Entwicklung der Donau sowie der zu erwartenden Baggermengen zwischen Straubing und Vilshofen, Oktober 2001;
4. Donau Straubing - Vilshofen
Untersuchung der Unterhaltsbaggermengen bei unterschiedlichen Fahrrinntiefen; September 2003;

In den Untersuchungen 1 und 2 zur Erosionsproblematik wurden die heutigen sedimentologischen und morphologischen Verhältnisse analysiert und der Geschiebebehalt aufgrund einfacher Zusammenhänge beurteilt. Aufgrund des gewählten Verfahrens konnten in den ersten beiden Untersuchungen nur Angaben über die Endzustände der Eintiefungsprozesse gemacht werden:

Wenn die Isar kein Geschiebe mehr in die Donau einträgt, wird sich diese zwischen der Isarmündung und der Felsstrecke oberhalb Vilshofen eintiefen. Dieser Eintiefungsprozeß wird auch eine rückwärtsschreitende Erosion in der Donau oberhalb der Isarmündung auslösen. Die Ausdehnung der Rückwärtserosion ist beschränkt. Unterhalb der Staustufe Straubing ist ebenfalls mit einem Erosionstrend zu rechnen. Allerdings ist dieser weniger ausgeprägt als unterhalb der Isarmündung. Zudem werden Deckschichtbildungsprozesse von einer Paralleleintiefung von geringem Ausmaß begleitet. Nur große Hochwässer werden zur Eintiefung der Donau zwischen Straubing und Vilshofen beitragen.

Beim 2. Gutachten wurden weitere Sedimentproben ausgewertet und einbezogen, weiter wurden für charakteristische Hochwasserereignisse die transportierten Geschiebefrachten berechnet und daraus die zu erwartenden Erosionsraten abgeschätzt. Zusammengefaßt ergab sich ein Bild, das sich mit demjenigen der ersten Untersuchung deckt. Da das Sohlmaterial in allen drei Teilstrecken nun leicht feiner ist, als in der ersten Untersuchung angenommen, ergaben sich etwas höhere Belastungen und damit pro Teilstrecke mehr Stellen, die erosionsgefährdet sind.

Der zeitliche Ablauf der Prozesse oder kurzfristige Sohlveränderungen, wie sie zur Abschätzung von Baggermengen erforderlich sind, können nur mit einem Simulationsmodell berechnet werden. Daher wurden weitere Untersuchungen durchgeführt und im 3. Gutachten dokumentiert. Im einzelnen sollten die folgenden Aspekte des Geschiebehaushalts untersucht werden:

- a) zu erwartende kurzfristige (10 Jahre) morphologische Veränderungen;
- b) zu erwartende langfristige (>10 Jahre) morphologische Veränderungen;
- c) Einfluß einzelner Hochwässer auf den Geschiebehaushalt;
- d) Einfluß einer Vergrößerung des Sohlenmaterials auf den Geschiebehaushalt (Grobkornanreicherung);
- e) Einfluß der Querprofilgeometrie auf die hydraulische Belastung (2-d-Effekte);
- f) zu erwartende Baggermengen bei größeren Fahrrinntiefen der Variante C.

Zur Beantwortung der gestellten Fragen mußte einerseits der zukünftige Geschiebehaushalt der Gesamtstrecke analysiert (Fragen a bis d) und andererseits die hydraulische Belastung in Teilstrecken (Frage e) mit ausgeprägten Sohlstrukturen (Bänke und Kolke) untersucht werden. Die Geschiebehaushaltsrechnungen wurden mit Hilfe eines 1d-Transportmodells durchgeführt. Zur Untersuchung der hydraulischen Belastung in Kurven wurde hingegen ein 2d-Strömungsmodell eingesetzt. Die Resultate des 2d-Modells wurden ausgewertet und nachfolgend im 1d-Modell weiterverarbeitet, um den Einfluß der unterschiedlichen Schubspannungen auf den Sedimenttransport aufzeigen zu können.

Mit dem eingesetzten numerischen Transportmodell MORMO können die morphologischen Prozesse und der Geschiebehaushalt eines Flusses erfaßt werden. Die Simulationen geben auch Auskunft über die Änderungen der Geschiebefrachten sowie den zeitlichen Verlauf der Sohlveränderungen.

In einer ersten Phase wurde das im Rahmen der Ziffer 1 erstellte vereinfachte Modell der Donau überarbeitet und ergänzt. Eine eigentliche Eichung war aufgrund der vorhandenen Daten nicht möglich. Aufgrund der Angaben der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) über die aktuellen Geschiebefrachten konnte das Modell jedoch verifiziert werden. Diesen Frachtangaben über den aktuellen Geschiebehaushalt kommt eine große Bedeutung zu, da die Modellparameter so eingestellt wurden, daß diese „beobachteten“ Frachten nachvollzogen werden können. Der Vergleich von berechneten und „beobachteten“ Geschiebefrachten ergab eine befriedigende Übereinstimmung, sodaß das Modell für Szenarienrechnungen eingesetzt werden konnte (Prognosefähigkeit).

Mit einem auf Mittelwerts-Hydraulik basierendem 1d-Transportmodell können die Belastungen nur vereinfacht nachgebildet werden. Um den Einfluß von Kurven, Bänken und Kolken auf die hydraulische Belastung erfassen zu können, wurden Strömungsberechnungen mit einem 2d-Modell zwischen der Isarmündung und Winzser durchgeführt. Die Resultate wurden statistisch bezüglich der Schubspannungsverteilung im Flußschlauch ausgewertet. Aufgrund dieser Resultate wurden verschiedene hydraulische Belastungen definiert und die Wirkung der entsprechenden Belastung auf die Sohle mit dem 1d-Transportmodell ermittelt.

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die ausgewählten Szenarien:

Tabelle: Szenarien zur Ermittlung des zukünftigen Geschiebehaushalts

Szenarium	Zweck	Abflussganglinie
sz1	Referenz	Referenzperiode (1971 bis 1980)
sz2	Nassperiode	Referenzperiode + HQ30 + HQ50
sz3	Extremereignis	Referenzperiode + HQ100
sz4	Grobkornanreicherung KVK Oberrhein unterhalb km 2281.7	Referenzperiode + HQ30 + HQ50
sz5	Variante C _{BAW} Staukote: 309 m ü.M. Stat.: km 2273.0 Geometrie der BAW zwischen Straubing und Aicha	Referenzperiode + HQ30 + HQ50
sz6	Langzeitszenarium	Ganglinie 1961 – 1990, 6 x wiederholt, + HQ30 + HQ50 + HQ100
sz7	HW-Szenarien	HQ20, HQ30, HQ50 und HQ100 künstliche Ganglinien des LfW

Resultate der Szenarienberechnungen:
Szenarien 1 – 3 (sz1 bis sz3)

Die Resultate der Simulationen zeigen, daß unterhalb Straubing, zwischen km 2319 und km 2316, durchschnittlich zwischen 6'000 und 9'000 m³ Geschiebe pro Jahr aus der Sohle erodiert werden. Das mobilisierte Material sättigt die Transportkapazität der Donau. Bis zur Isarmündung wird es jedoch teilweise wieder abgelagert. Die größten Geschiebefrachten werden im Szenarium 2 erreicht. Sie liegen um rund 3'000 m³/Jahr über den Frachten der Referenzperiode.

Unterhalb der Isarmündung ist mit wesentlich größeren Frachten zu rechnen und auch die Unterschiede zwischen den einzelnen Szenarien sind größer. Beim Referenzszenarium sz1 werden zwischen der Isarmündung und der Mühlhamer Schleife rund 22'000 m³ Geschiebe pro Jahr aus der Sohle mobilisiert. Beim Szenarium 2, welches wiederum die größten Frachten erzeugt, werden auf der gleichen Strecke rund 6'000 m³/J mehr erodiert. Zwischen der Mühlhamer Schleife und Vilshofen nimmt das Transportniveau beim Referenzszenarium nur noch von 22'000 m³/J auf 25'000 m³/J zu. Auf dieser Teilstrecke sind jedoch mehrere Auflandungs- und nachfolgende Erosionsstrecken festzustellen. Die maximal transportierten Frachten betragen rund 35'000 m³/J und werden im Szenarium 2 bei Hofkirchen erreicht.

Szenario 4 (sz4)

Der Einfluß einer Grobkornanreicherung zwischen der Isarmündung und Vilshofen ist gut sichtbar. Infolge der Vergrößerung des Unterschichtmaterials werden im Bereich des Isarschüttkegels nur noch 9'000 m³/J erodiert und das Transportniveau liegt generell tiefer als im Vergleichsszenarium sz2. Bei den Simulationen wurde davon ausgegangen, daß die Schichtdicke der Grobkornanreicherung genügend groß ist, sodaß auch bei einer Erosion noch kein Durchschlag ins heutige feinere Unterschichtmaterial erfolgen kann.

Szenario 5 (sz5)

Szenarium 5 zeigt den Einfluß der Staustufe Aicha auf den Geschiebehaushalt in der betrachteten Periode von 10 Jahren bei einer gleichzeitigen Fahrrinnenvertiefung. Gegenüber dem Vergleichsszenarium 2 wird unterhalb der Isarmündung etwas weniger Geschiebe erodiert, dafür ist unterhalb der Staustufe mit einer Kompensation des Defizites, d.h. mit größeren Erosionen als im Szenarium 2, zu rechnen.

Szenario 6 (sz6)

Ohne Geschiebeeintrag wird an der Donau ein **langfristiger Erosionsprozess** einsetzen. Szenarium 6 zeigt, daß auch nach 180 Jahren die Prozesse noch nicht abgeschlossen sein werden. In den ersten 50 Jahren ist die Erosionstendenz vor allem unterhalb Straubing und unterhalb der Isarmündung groß. In den nachfolgenden Perioden sind die Eintiefungsraten geringer, jedoch sind immer noch auf der ganzen Strecke zwischen Straubing und Hofkirchen Erosionen festzustellen. Die Zunahme der Geschiebefrachten im Bereich Deggendorf sind eine Folge der Rückwärtserosion ausgehend von der Isarmündung. Nach 180 Jahren betragen die Eintiefungen unterhalb Straubing im Mittel ca. 1.4 m und unterhalb der Isarmündung ca. 2 m.

Da in der Simulation keine Baggerungen angenommen wurden, ist im Bereich der Stauwurzel vom Wehr Kachlet ein Verlandungsprozess zu beobachten.

Deckschichtbildung

Infolge der Eintiefung ist ein markanter Deckschichtbildungsprozess festzustellen.

Szenario 7 (sz7)

Bei größeren Hochwässern werden an der Donau große Geschiebemengen umgesetzt. Die Resultate von Szenarium 7 zeigen, daß im Hochwasserfall die Ereignisfrachten lokal wesentlich größer sind als die Jahresfracht in einem durchschnittlichen Jahr. Zu berücksichtigen ist allerdings, daß die verwendeten künstlichen Ganglinien ein sehr großes Abflußvolumen aufweisen. Die maximalen Frachten werden im Bereich Hofkirchen erreicht und betragen für ein HQ20 rund 90'000 m³ und für ein HQ rund 130'000 m³. Die Sohlenveränderungen liegen in der Größenordnung von +/-50 cm. Die maximalen treten in den Bereichen Niederalteich, Mühlham und Hofkirchen auf. Generell fällt auf, daß bei Hochwasser sehr viele Auflandungs- und nachfolgende Erosionszonen auftreten. Diese Charakteristik der Donau dürfte auf die Abflaufaufteilung zwischen Hauptgerinne und Vorland einerseits und auf die Unterhaltsbaggerungen andererseits zurückzuführen sein. Falls mehr Wasser im Vorland abfließt, ist mit Ablagerungen im Hauptgerinne zu rechnen. Sobald das Wasser wieder zurückfließt, nimmt auch die Transportleistung wieder zu. Nach dem Hochwasser, wenn wieder der größte Teil des Abflusses im Hauptgerinne abfließt, ist mit Geschiebeumlagerungen zu rechnen. Die Unterhaltsbaggerungen wirken wie ein Geschiebefang und führen dazu, daß Geschiebe abgelagert wird. Dieses fehlt in den flußabwärtsliegenden Strecken, sodaß es dort zu Erosionserscheinungen kommt.

Die Ergebnisse der bisherigen morphologischen Untersuchungen von Hunziker & Zarn lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Kurzfristig wird ein Geschiebedefizit vor allem zwischen Straubing und Reibersdorf resp. zwischen der Isarmündung und Mühlham durch die Mobilisierung von Geschiebe aus der Sohle kompensiert. Die mittleren Sohlenerosionen betragen rund 0,2 bis 0,3 m.
- Langfristig werden die morphologischen Prozesse ohne Gegenmaßnahmen sehr lange anhalten und auch nach 100 Jahren noch nicht abgeschlossen sein. Die maximalen Erosionen betragen nach 100 Jahren an der Isarmündung ca. 1,5 m und in Straubing ca. 1 m. Anschließend ist mit weiteren, wenn auch wesentlich geringeren Eintiefungen zu rechnen.
- Bei Hochwasser werden im Vergleich zu einem Normaljahr wesentliche größere Geschiebemengen umgesetzt und mehrere Auflandungs- und Erosionszonen sind festzustellen. Die maximalen Frachten werden im Raum Hofkirchen transportiert und erreichen bei einem AQ20 rund 90.000 m³ und bei einem HQ100 rund 130.000 m³. Die maximalen Ablagerungsraten betragen oberhalb des Staubereichs des Wehres Kachlet bis zu 55.000 m³.
- Mit einer Grobkornanreicherung können die großräumigen Erosionen, insbesondere unterhalb der Isarmündung reduziert werden. Entsprechend den geringeren Sohlveränderungen sind auch die umgesetzten Geschiebefrachten geringer.

2-d- Untersuchungen von Herrn Dr.-Ing. habil. H.H. Bernhart, apl. Prof. am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH)

1. Aufgabenstellung

An der TU Karlsruhe hat Herr Bui Minh Duc im Rahmen seiner Dissertation ein Rechenmodell für die zweidimensionale Simulation von Transportvorgängen in Flüssen entwickelt (vgl. Veröffentlichung in der Zeitschrift *Wasserwirtschaft* vom Juni 2000, Seite 282ff). Damit wird eine wesentlich detailliertere Betrachtungsweise der Vorgänge ermöglicht, als dies ein eindimensionales Modell konnte. Zielsetzung war hier nicht die Prognose der langjährigen Entwicklung – dies war die Aufgabe der Untersuchungen von Hunziker und Zarn – sondern die Dokumentation des Geschehens beim Durchlaufen verschiedener Hochwasserwellen unter Einfluß einer Vergrößerung des Geschiebematerials, bei der sog. Deckschichtbildung, die beim Ausbleiben des Geschiebenachschubs eintritt.

2. Auswahl des Untersuchungsbereichs

Bereits aus den Ergebnissen der früheren Untersuchungen von Hunziker und Zarn (o.a. Berichte Nr. 1 und 2) ergab sich, daß im Flußabschnitt Oberstrom der Isarmündung keine gravierenden Erosionsprobleme zu erwarten sind. Dies stimmt einer früheren zweidimensionalen Berechnung von Herrn Dr. Bernhart im Bereich der Reibersdorfer Kurven überein. Um schlußendlich auch den Rechenaufwand für die 2-d-Modellierung in vertretbaren Grenzen zu halten, wurde der Untersuchungsabschnitt von der Isarmündung bis unterhalb der Mühlhamer Schleife bei Winzer gewählt.

3. Auswahl der Hochwasserereignisse

Da gemäß den Angaben im Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch von 1995 dokumentiert ist, daß das Hochwasserereignis vom Juli 1954 der bisher höchste Abschluß im letzten Jahrhundert war, wurde dieses Hochwasser zugrundegelegt. Der Ablauf dieser Hochwasserwelle wurde vom Bayerischen Staatsministerium des Innern in der Broschüre „die Hochwasserkatastrophe des Jahres 1954 in

Bayern“ sehr gut dokumentiert. Die dem Hochwasserabfluß vom Juli 1954 zuge-

ordnete Ganglinie kommt bezüglich des Abflußscheitelwertes einem 50-jährlichen Hochwasserereignis nahe, in der Fülle war es jedoch deutlich schwächer ausgeprägt, als das vom Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft angegebene 50-jährliche Bemessungsereignis; dieses wurde daher als zweite Hochwasserwelle in die Berechnungen einbezogen.

Neben diesen selten auftretenden Hochwasserwellen mit Abflüssen von über $3.600 \text{ m}^3/\text{s}$, wurde als dritte Welle, das beim Hochwasser vom Sommer 1995 aufgetretene Ereignis mit einem Spitzenabfluß von $2060 \text{ m}^3/\text{s}$ einbezogen. Die ausgewählten Hochwasserwellen sind somit wie folgt charakterisiert:

- großer Abfluß mit vergleichsweise kleiner Fülle (das Abflußvolumen ist deutlich geringer als beim HQ_{50}): Verlauf der Welle wie beim **Abfluß des HW 1954** (01.07. – 31.07.1954)
- großer Abfluß mit vergleichsweise großer Fülle: **HQ_{50} gemäß Angaben des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft**
- ein Hochwasserabfluß, der alle zwei bis drei Jahre zu erwarten ist, am Beispiel des **HW 1995** (21.01. – 20.02.1995).

Der Vergleich der Berechnungsergebnisse, die sich beim Ablauf dieser drei Wellen ergeben, ermöglicht eine gute Beurteilung der zu erwartenden Geschiebemenngen und der Veränderungen, die bei einer Entwicklung hin zur Deckschichtbildung zu erwarten sind. Alle Berechnungen wurden instationär durchgeführt, die zeitliche Entwicklung der Hochwasserwellen also dem jeweiligen Ereignis entsprechend berücksichtigt.

Da die Hochwasserwellen HW1954 sowie HW1995 den damals abgelaufenen Ereignissen nachempfunden sind bzw. entsprechen, können die jeweils aufgetretenen Abflüsse bestimmten Tagen zugeordnet werden; beim HQ_{50} ist dies nicht der Fall, da es einem theoretisch festgelegten Berechnungsereignis entspricht.

4. Hydraulische Eichung des mathematischen Modells

Zur Eichung des Modells lagen Wasserspiegelbemessungen aus der Natur vor. Die zugehörigen Abflüsse beziehen sich auf die Angaben für den Pegel Pfalling (Oberstrom der Isarmündung) sowie dem Pegel Hofkirchen (Unterstrom der Isarmündung). Die Eichung erfolgte durch Zuordnung von Rauigkeitsparametern (Strickler-Beiwerke) zu den einzelnen Berechnungsgittern. Diese müssen – in

plausiblen Bereichen – so lange variiert werden, bis Wasserspiegellagen und Abflüsse von Material und Natur übereinstimmen.

In dem Abschnitt, in dem Hunziker und Zarn zweidimensionale Berechnungen durchgeführt haben, stimmen die Ergebnisse mit denen von Dr. Bernhart sehr gut überein.

5. Auswahl der Parameter für die Geschiebetransportberechnungen

Der Festlegung des mittleren Korndurchmessers und des Θ_{crit} -Wertes kommt hinsichtlich des Geschiebetransportes eine ausschlaggebende Bedeutung zu. Um diesen Einfluß aufzeigen zu können, wurden im Hinblick auf den Vergleich mit den Ergebnissen der Studie von Hunziker & Zarn vom Sept. 2001 folgende Parameter in die Berechnungen einbezogen:

$$\begin{aligned} d_m &= 12,5 / 16 / 17 / 22 \text{ mm} \\ \Theta_{crit} &= 0,43 / 0,47 / 0,60 / 0,72. \end{aligned}$$

Bei allen Berechnungen wurde davon ausgegangen, daß sowohl **aus der Donau oberstrom** der Isarmündung als auch **von der Isar kein Geschiebe** mehr eingetragen wird.

6. Darstellung der Berechnungsergebnisse

Die Berechnungen wurden für die o.a. Hochwasserwellen durchgeführt und die Ergebnisse wurden flächenhaft grafisch dargestellt.

Die für die Ermittlung der **Transportmengen** beispielhaft ausgewählten **Querprofile**, die mit A-A bis F-F bezeichnet wurden, beziehen sich auf folgende Donau-km:

Querprofil	Donau-km	Querprofil	Donau-km
A-A	2281,5	B-B	2278,0
C-C	2275,5	D-D	2272,1
E-E	2269,6	F-F	2266,2

Hochwasser vom Juli 1954

Die Berechnungen für diesen Hochwasserabfluß wurden für einen mittleren Korndurchmesser von 12,5 mm und mit $\Theta_{crit} = 0,047$ sowie $= 0,073$ durchgeführt: Der Wert 0,047 entspricht den Angaben von Meyer-Peter/Müller und der Wert 0,073 wurde von Hunziker & Zarn im Hinblick auf eine Entwicklung der Deckschicht angegeben (vgl. Bericht vom Februar 1999).

Die Ergebnisse bestätigen den sehr großen Einfluß des von der Kornzusammensetzung des Sohlenmaterials abhängigen Θ_{crit} -Wertes und belegt zudem, daß das Transportverhalten in dieser Flußstrecke stark von den örtlichen Gegebenheiten geprägt wird: Geschiebematerial, das infolge des fehlenden Geschiebeeintrages von oberstrom und der Isar im Bereich des Isarschüttkegels aufgenommen wird, lagert sich unterstrom davon wieder ab.

Nur im Bereich der Mühlhamer Kurve kommt es zu größeren Sohlenumlagerungen: Das in den Erosionsbereichen ausgetragene Material führt unterstrom der Eintiefungen zu Anlandungen; dieser Vorgang wiederholt sich mehrmals. Zuvor eingetiefte Bereiche werden infolge des Durchwanderns des Geschiebes zu einem späteren Zeitpunkt wieder verfüllt.

Die transportierten Mengen gehen bei einer Entwicklung zur Deckschichtausbildung, was durch den größeren Θ_{crit} -Wert gekennzeichnet ist, sehr stark zurück.

7. Hochwasser vom Januar / Februar 1995

Die Berechnungen für das HW-Ereignis von 1954 bezogen sich auf eine Welle mit einem relativ großen Scheitelabfluß von $Q = 3830 \text{ m}^3/\text{s}$. Zielsetzung der Berechnungen für das Hochwasser von 1995 war das Aufzeigen des Einflusses und der Veränderungen, die bei einem deutlich niedrigeren Maximalabfluß zu erwarten sind; bei der HW-Welle vom Jan./Febr. 1995 lag der Spitzenabfluß bei $2060 \text{ m}^3/\text{s}$.

Zum direkten Vergleich wurde der erste Berechnungslauf mit den gleichen Parametern durchgeführt, wie sie auch zuvor gewählt wurden: $\Theta_{\text{crit}} = 0,047$ und mittlerer Korndurchmesser $d_m = 12,5 \text{ mm}$. Ein weiterer Berechnungslauf bezog sich auf ein Zwischenstadium der Deckschichtbildung, wobei unter Beibehaltung des mittleren Korndurchmessers für $\Theta_{\text{crit}} = 0,060$ gewählt wurde.

Von besonderem Interesse sind jedoch die Veränderungen, die sich bei einem größeren mittleren Korndurchmesser ergeben. Die Angaben für ausgewählte Querprofile, die in der folgenden Tabelle zusammengestellt sind, sollen dies verdeutlichen.

Variante a): $d_m = \text{konstant}$, $\Theta_{\text{crit}} = \text{variiert}$ (Zeitraum 21. Jan. – 20. Febr.)

d_m (mm)	Θ_{crit}	G in Profil D-D (m^3)	G in Profil F-F (m^3)
12,5	0,043	56300	105700
12,5	0,047	13500	4300
12,5	0,060	1400	13200

Variante b): $d_m = \text{variiert}$, $\Theta_{\text{crit}} = \text{konstant} = 0,043$ (Zeitraum 26. Jan. – 02. Febr.)

d_m (mm)	Θ_{crit}	G in Profil D-D (m^3)	G in Profil F-F (m^3)
12,5	0,043	10000	20400
17,0	0,043	120	3000
22,0	0,043	0	0

Variante c): $d_m = \text{variiert}$, $\Theta_{\text{crit}} = \text{konstant} = 0,060$ (Zeitraum 26. Jan. – 02. Febr.)

d_m (mm)	Θ_{crit}	G in Profil D-D (m^3)	G in Profil F-F (m^3)
12,5	0,060	1100	6600
17,0	0,060	0	0

Tabelle Geschiebetransport G (m^3) in ausgewählten Querprofilen bei unterschiedlicher Wahl der Parameter d_m und Θ_{crit} ; Hochwasserabfluß vom Jan. / Febr. 1995, Scheitelwert des Abflusses $Q_{\text{max}} = 2060 \text{ m}^3/\text{s}$

Die in dieser Tabelle angegebenen Zahlenwerte zeigen, daß bei einer Vergrößerung des Sohlenmaterials von einem mittleren Korndurchmesser von 12,5 mm auf ca. 17 mm der Geschiebetransport bei einem Hochwasserabfluß bis ca. $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ nahezu zum Erliegen kommt. Da es bei einem Ausbleiben des Geschiebenachschubs von oberstrom und aus der Isar zwangsläufig zu einem Auswaschen von kleineren Kornfraktionen kommen wird, geht die Entwicklung hin zur Ausbildung einer größeren Sohle und somit werden die Sohlenumlagerungen im Laufe der Zeit immer weniger ausgeprägt sein.

8. Hochwasser mit einer Wiederkehrwahrscheinlichkeit von 50 Jahren (HQ_{50})

Die vorher erläuterten Berechnungsergebnisse bezogen sich auf ein Hochwasserereignis mit einer steil ansteigenden Welle mit großem Spitzenabfluß aber relativ geringer Fülle (HW 1954) bzw. der Spitzenabfluß erreichte nur einen Wert, der einem 2 bis 3-jährlichen Hochwasserereignis entspricht (HW 1995). Es bleibt zu überprüfen, wie sich die Situation beim Ablauf einer Hochwasserwelle mit deutlich größerer Fülle als 1954 und einem deutlich größeren Spitzenabfluß als 1995 darstellt.

Ausgewählt wurde eine vom Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft angegebene Bemessungswelle mit einem Scheitelabfluß von 3680 m³/s und einer Wiederkehrwahrscheinlichkeit von 50 Jahren.

Die folgende Tabelle zeigt den Vergleich der instationär ermittelten Gesamtmen- gen bei Theta_{crit} = 0,043 und 0,047:

Variante a): d_m = variiert, Theta_{crit} = konstant = 0,043 (Zeitraum 28 Tage)

d _m (mm)	Theta _{crit}	G in Profil D-D (m ³)	G in Profil F-F (m ³)
12,5	0,043	66000	118500
16,0	0,043	11600	38600
17,0	0,043	5600	26300
22,0	0,043	0	360

Variante b): d_m = konstant, Theta_{crit} = variiert (Zeitraum 28 Tage)

d _m (mm)	Theta _{crit}	G in Profil D-D (m ³)	G in Profil F-F (m ³)
16,0	0,043	11600	38600
16,0	0,047	4800	24900

Tabelle Geschiebetransport G (m³) in ausgewählten Querprofilen bei unterschiedlicher Wahl der Parameter d_m und Theta_{crit}; Hochwasserabfluß = Bemessungswelle HQ50, Scheitelwert des Abflusses Q_{max} = 3680 m³/s

Die Tendenz entspricht den Ergebnissen der zuvor erläuterten Berechnungen: Sofern ein größerer Korndurchmesser maßgebend ist, und es zu einer Entwicklung in Richtung Deckschichtausbildung kommt, nehmen die Geschiebetransportmen- gen drastisch ab. Bemerkenswert ist, wie stark sich eine Änderung von nur 1 mm beim mittleren Korndurchmesser auswirkt; vgl. Werte bei d_m = 16 mm bzw. 17 mm bei Variante a) und ebenso die Änderung von Theta_{crit} = 0,043 auf 0,047, vgl. Werte bei Variante b).

Zukünftige Unterhalts-Baggermengen

Der Geschiebehaushalt der Donau ist nicht ausgeglichen. Die numerischen Simu- lationen zeigen, daß ohne Baggerungen das Geschiebe in gewissen Abschnitten abgelagert und in anderen Abschnitten wieder erodiert wird. Da die Auflandungen für die Schifffahrt nicht akzeptabel sind, weil sie die zur Verfügung stehende Was- sertiefe verringern, wird mit den Unterhaltsbaggerungen der Geschiebetransport ausgeglichen und ein Kontinuum erzwungen. Durch die geplanten Verbesserungen

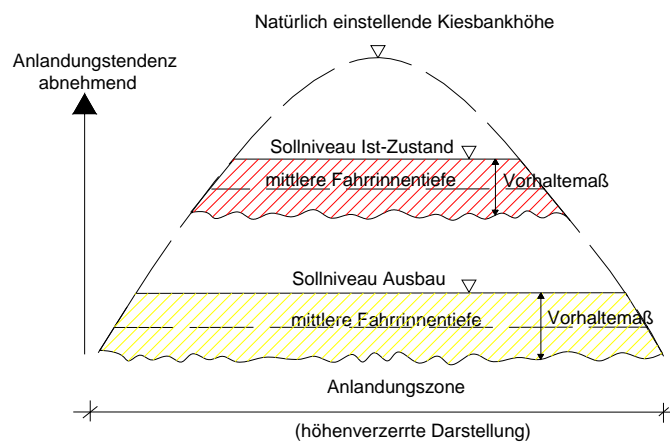
der Schiffsbedingungen wird die Fahrrinntiefe weiter erhöht werden. Die Geschiebehaushaltssimulationen zeigen, daß auch bei unterbundenem Geschiebeeintrag Geschiebe mobilisiert wird. Es muß daher auch in der Zukunft zur Gewährleistung einer gesicherten Fahrrinntiefe gebaggert werden.

Zur Bestimmung der Baggermengen für die Ausbauzustände müssen einige Bedingungen und Annahmen getroffen werden:

Je tiefer unterhalten wird, umso mehr muss gebaggert werden, da die Anlandungstendenz mit größerer Unterhaltungstiefe zunimmt.

Je mehr sich die Sollfahrrinne von der sich natürlich einstellenden Fließtiefe unterscheidet, umso mehr Geschiebe bleibt liegen (vgl. Skizze unten).

Durch Regelungmaßnahmen kann die Anlandungstendenz insgesamt verringert werden. Somit sind bei gleichen Unterhaltsaufwendungen größere Fahrrinntiefen möglich.



Anlandungstendenz in Abhängigkeit der Unterhaltungstiefe

Zur Ermittlung der Baggermengen wurde das bisherige numerische 1d-Modell eingesetzt. In mehreren Schritten wurde dieses so angepaßt und ergänzt, daß Baggerungen und Wiederverklappungen des Materials dargestellt und simuliert werden konnten.

Das Hauptproblem bei der Untersuchung der zukünftigen Baggermengen bestand darin, daß das Modell bezüglich der Baggerungen nicht geeicht werden kann. Die Zusammenstellungen des Wasser- und Schiffsamtes für die einzelnen Jahre unterscheiden nicht zwischen Unterhalts- und Herstellungsbaggerungen. Um wenigstens die Größenordnung der berechneten Baggermengen überprüfen zu können, wurden die mittleren berechneten Baggermengen auf der Basis Ganglinie von 1971 bis 1980 mit den ausgewiesenen Baggermengen der Jahre 1998 bis 2000 verglichen. Die Größenordnung der berechneten Baggermengen stimmt in etwa mit den beobachteten (ausgewiesenen) Baggermengen überein.

Die Resultate der Simulationen zeigten, daß bei zunehmender Fahrrinntiefe von 2,0 auf 2,2 m die Baggermengen von rund 60.000 m³/J auf rund 120.000 m³/J an-

steigen. Bei der Variante C betragen sie bei einer Fahrrinntiefe von 2,7 m $140.000 \text{ m}^3/\text{J}$.

Diese Berechnungen wurden im Modell mit einem Querprofilabstand im Mittel von rund 400 m durchgeführt. Dieser Abstand wird als relativ groß beurteilt. Durch eine Verdichtung der Querprofile konnte dann später noch die Sohlentopographie besser erfaßt und dadurch die Baggermengen genauer prognostiziert werden. Um die vermuteten Ungenauigkeiten bei der Ermittlung der Baggermengen infolge des großen Profilabstandes von 400 m auszuschalten, wurden neue Untersuchungen mit einem Profilabstand im Mittel von 100 Metern durchgeführt. Es wurden drei Szenarien mit der Abtiefung der Sohle im Bereich des Fahrrinnenkastens um 2,7, 2,8 bzw. 3,0 m, je nach Variante durchgeführt. Weiter wurden die Änderungen an den Bunen und Parallelwerken gegenüber dem Ist-Zustand berücksichtigt sowie Kolkverbauungen eingearbeitet.

Die weiteren Betrachtungen gehen nun von der hydraulisch wirksamen Tiefe = mittlere Fließtiefe im Bereich der Fahrrinne, entspricht dem entsprechenden Wert aus der hydraulischen Berechnung ohne Berücksichtigung von Unebenheiten, aus. Gemäß Angaben der BAW ist bei Unterhaltsbaggerungen mit Unebenheiten von $\pm 15 \text{ cm}$ zu rechnen, die die ausgeglichene Sohle überlagern. Die für die Schifffahrt zu gewährleistende Fahrrinntiefe = Sohlentiefe, ist wegen den Unebenheiten rund 15 cm geringer als die hydraulisch wirksame Fließtiefe.

Falls die Unebenheiten über die Solltiefe auflanden, wird in der Praxis gebaggert. Dabei wird nicht der ganze Sohlbereich innerhalb des Fahrrinnenkastens gebaggert, sondern es werden nur die Unebenheiten abgetragen. Bei den Baggerungen wird eine zusätzliche Vorratsbaggerung von ca. 20 cm unter die Solltiefe mitberücksichtigt.

Neben der hydraulischen Eichung wurde eine morphologische Verifikation durchgeführt. Diese basiert auf dem Vergleich der „gemessenen“ Bagger – resp. Verklappungsmengensummenkurven der Jahre 1998 bis 2001 mit den Resultaten einer Simulation der Periode 1998 bis 2001. Diese Baggermengen wurden nach Umstellung von 2,0 m unter RNW 87 auf 2,0 m unter RNW 97 beobachtet und sollten darum keine Herstellungsbaggermengen mehr beinhalten. Durch die Einteilung der Gerinnequerschnitte in Bereiche mit unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten wurden die lokalen Strömungsverhältnisse vereinfacht nachgebildet und analog zum Vorgehen mit den gewässerspezifischen Parametern so lange angepaßt, bis eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen den berechneten und den „gemessenen“ Baggermengen erreicht wurde. Als zweiter Parameter wurde auch die Kornverteilung des Sohlmaterials variiert, es zeigte sich aber, daß die in früheren Berichten gefundenen Kornverteilungskurven mehrheitlich übernommen werden konnten.

Die Resultate der Simulationen zeigen, daß bei der Einstufenvariante C die Baggermengen im Vergleich zum IST-Zustand massiv zunehmen. Bei einer hydraulischen Wassertiefe von 2,8 m werden Baggermengen von rund $155.000 \text{ m}^3/\text{J}$ und

bei einer solchen von 3,0 m Baggermengen von rund 180.000 m³/J berechnet. Beim IST-Zustand mit einer hydraulischen Wassertiefe von 2,15 m wurden 67.000 m³/J berechnet. Bei all diesen Resultaten ist jedoch zu berücksichtigen, daß sie auf einer Ganglinie mit vielen Hochwässern basieren. Ergänzende Simulation mit einer Ganglinie mit kleineren Hochwässern zeigen, daß in diesem Fall die Baggermengen kleiner werden.

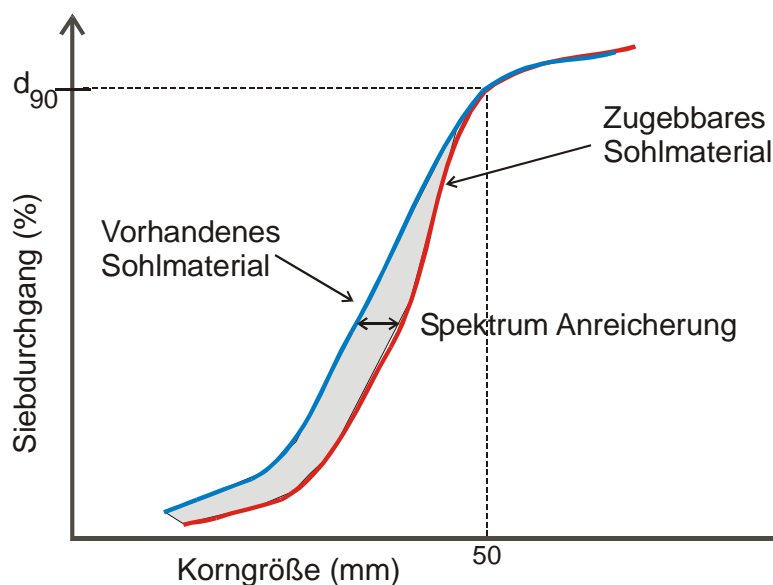
Obwohl das Modell mit einem Querprofilabstand von 100 Metern sehr detailliert aufgebaut ist, müssen die Baggermengen doch als Größenordnung betrachtet werden, da insbesondere die kleinräumigen geometrischen Einflüsse nur schwer zu erfassen sind. Aus diesem Grund dürfen die Angaben auch nicht zu lokal ausgewertet werden. Genauere Aussagen sind erst dann möglich, wenn das Modell mit zusätzlichen Daten (Aufzeichnungen über Baggermengen ohne die Störungen von Herstellungsbaggerungen und bei unterschiedlichen hydrologischen Jahren) besser geeicht werden kann.

Die Resultate der morphologischen Untersuchungen über den Geschiebehaushalt der Donau (vgl. vorstehende Gutachten Nr. 1 und 2 von Hunziker und Zarn) ergeben, daß sich die Sohle ohne Geschiebezufuhr bei Straubing und bei einem Versiegen der Zufuhr aus der Isar eintiefen wird. Die BAW geht davon aus, daß im IST-Zustand zur Sohlenstabilisierung oberhalb der Isarmündung rund 15.000 m³/J und unterhalb der Isarmündung rund 35.000 m³/J pro Jahr zugegeben werden müssen, für die Variante C werden 12.000 resp. 28.000 m³/J angegeben. In den oben angeführten Szenarien wird von einem Geschiebeeintrag in Straubing von 12.000 m³/J und unterhalb von Aicha von 30.000 m³/J pro Jahr ausgegangen. Diese Kubaturen müssen zu den Baggermengen dazugerechnet werden. Das Material könnte z.B. aus Ablagerungen im Bereich Kilometer 2290 und bei Kilometer 2250 gewonnen werden. Die von der BAW vorgeschlagene Geschiebemanagement der Straubinger Schleife ist im Modell nicht berücksichtigt, da das Geschiebe unterhalb der Schleife, also außerhalb der zu betrachteten Strecke für die Geschiebeberechnung, bereits wieder entnommen wird.

Eine Grenze für die Baggermengen bildet die aus technischer und wirtschaftlicher Sicht maximale Menge pro Jahr. Dieser Grenzwert bestimmt auf welche Fahrrinnentiefe die Wasserstraße wirtschaftlich sinnvoll zu unterhalten ist. Die Größe basiert auf Erfahrungswerten des verantwortlichen Schifffahrtsamtes und wurde für den Ist-Zustand 2000 auf 75.000 m³/Jahr festgelegt. Für die Varianten A und B wurden ebenfalls die gleichen Maximalwerte vorgegeben. Eine Ausnahme bildet die Variante C, da wegen der Stufe bei Aicha der morphologisch aktivste Bereich überstaut ist und die zu unterhaltende Strecke verkürzt würde, sind bei Variante C max. 160.000 m³/Jahr an Baggermengen zulässig. Begründet wird dies durch den geringeren logistischen Aufwand für die Baggerungen.

Grobkornanreicherung

Eine Grobkornzugabe erfolgt nach den gleichen Prinzipien wie bei der „konventionellen“ Geschiebezugabe, nur mit dem Unterschied, dass die Kornverteilung des Zugabematerials nicht mehr identisch mit der des Sohlmaterials ist. Wie der Name schon sagt, wird hier die Kornverteilung in Richtung gröberes Korn verschoben und somit die Widerstandskraft der Sohle gegen den Strömungsangriff erhöht. Der Vorteil der Grobkornanreicherung liegt nun darin, dass dadurch geringere Zugabemengen und Unterhaltungsaufwendungen anfallen. Nun könnte das Zugabematerial so stark vergrößert werden, dass langfristig der Geschiebetrieb deutlich abnimmt und somit keine Geschiebewartung notwendig ist. Doch sind bei der Vergrößerung Grenzen gesetzt. Die Kornverteilung der Sohle kann nur soweit verändert werden, dass die Sohlabstände für die Schifffahrt gleich bleiben (siehe dazu auch Zusammenfassung Fahrdynamik). Würden durch die Grobkornanreicherung größere Sohlabstände erforderlich werden, würde sich dies negativ auf die Abladetiefe auswirken. Der Sohlabstand ist eine Funktion des Schädigungspotenziales an den Antriebsorganen der Schiffe, d.h. soll der Sohlabstand gleich bleiben, darf das Schädigungspotenzial ein vorgegebenes Maß nicht überschreiten. Dieses Maß wurde anhand von Erfahrungswerten und Untersuchungen ermittelt und auf eine Korngrößenverteilung übertragen. Als oberer Grenzwert für eine Grobkornanreicherung wurde vom Arbeitsteam Fahrdynamik die Kornverteilung des Oberheins empfohlen. Eine weitere Grenze wurde mit dem $d_{90} = 50$ mm vorgegeben. Somit ist das Spektrum, in dem eine Grobkornanreicherung möglich ist, genau definiert (siehe Skizze unten). Wegen der noch relativ großen Unsicherheiten in der Anwendung, die bei diesen Verfahren noch bestehen, wurde im Rahmen der variantenvergleichenden Untersuchungen die Grobkornanreicherung nicht empfohlen. Im Falle einer Realisierung ist eine Grobkornanreicherung im „learning by doing“-Verfahren anzuwenden und durch ständiges Monitoring der Sohle und der Schiffsschrauben zu begleiten.



Skizze zu Kornverteilungskurven

Folgerungen für die Variante C und deren Optimierungen:

Die von Hunziker & Zarn errechneten Baggermengen für die hydraulisch wirksamen Wassertiefe von 2,80 m liegen mit rd. $155.000\text{m}^3/\text{J}$ innerhalb der Grenze der wirtschaftlich darstellbaren Baggermengen. Daß das von der BAW erwartete exponentielle Ansteigen der Baggermengen bei größeren Tiefen durch die Berechnungen von Hunziker & Zarn nicht belegt wird, ist kein Widerspruch; stellt doch die BAW selbst die große Unsicherheit von Geschiebetransportrechnungen fest. Die Berechnungen von apl. Prof. Dr. habil. H.H. Bernhart stützen eher die Ergebnisse von Hunziker & Zarn und zeigen auch die Einflüsse der Korngrößen deutlich auf. Eine Verringerung der Unterhaltungsbaggermengen ist nach übereinstimmender Meinung aller Gutachter durch eine Grobkornanreicherung möglich, wenn die oben aufgezeigten Grenzen beachtet werden. Dann scheint selbst die Optimierung bis zu einer hydraulisch wirksamen Wassertiefe von 3,0 m unter RNW in den Bereich des wirtschaftlich Machbaren zu kommen.