

Inhaltsverzeichnis

1 Problemstellung und Auftrag.....	3
2 Allgemeines zum Geschiebetransport	4
3 Erosionsformen.....	6
4 Charakteristische Daten der Untersuchungsstrecke.....	8
5 Methodik	12
5.1 Übersicht	12
5.2 Detaillierte Ermittlung der Belastung mit Hilfe eines numerischen Modells	12
5.3 Globale Betrachtung mit Hilfe von charakteristischen Grössen in drei Teilstrecken	14
5.4 Grenzen der Methoden	15
6 Resultate	16
6.1 Eichung des numerischen Modells	16
6.2 Resultate der Berechnungen und Beurteilung des Erosionspotentials	17
7 Zusammenfassung	20

Inhaltsverzeichnis Anhang

Verwendete Grundlagen	21
Literatur.....	21
Berichte, Pläne und Dokumente	21
Bild A1: Ausgewählte Dauerkurven bei Pfelling und bei Hofkirchen	22
Bild A2: Längenprofil	23
Bild A3: Sohlenbreite	24
Bild A4: Wasserspiegelgefälle bei HNN _{IST}	25
Bild A5: Korndurchmesser d_m (1997).....	26
Bild A6: Korndurchmesser d_{90} (1997)	27

Bild A7:	Berechnete Geschiebefrachten	28
Bild A8:	Vergleich von gemessenen und im numerischen Modell verwendeten Korndurchmessern	29
Bild A9:	Vergleich der Belastung θ mit dem Widerstand θ_{Dcr} der Deckschicht für den Abfluss HNN_{IST}	30
Bild A10:	Vergleich der Belastung θ mit dem Widerstand θ_{Dcr} der Deckschicht für den Abfluss $HW_{100 IST}$	31
Bild A11:	Theoretisches Längenprofil basierend auf den Grenzgefällen der drei Teilstrecken.....	32

1 Problemstellung und Auftrag

Das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie (StMWVT) beauftragte mit Brief vom 5. Mai 1998 die Hunziker&Zorn AG in Aarau (CH), ein Gutachten über die morphologische Entwicklung der Donau zwischen Straubing und Vilshofen zu erstellen. Das StMWVT geht davon aus, dass mittel- bis langfristig keine relevanten Geschiebemengen mehr in diesen Donauabschnitt eingetragen werden. Die Gründe dafür sind die kürzlich erstellte Staustufe Straubing, welche den Geschiebetransport in der Donau unterbricht, sowie die Massnahmen zur Bekämpfung der Erosion in der Isar.

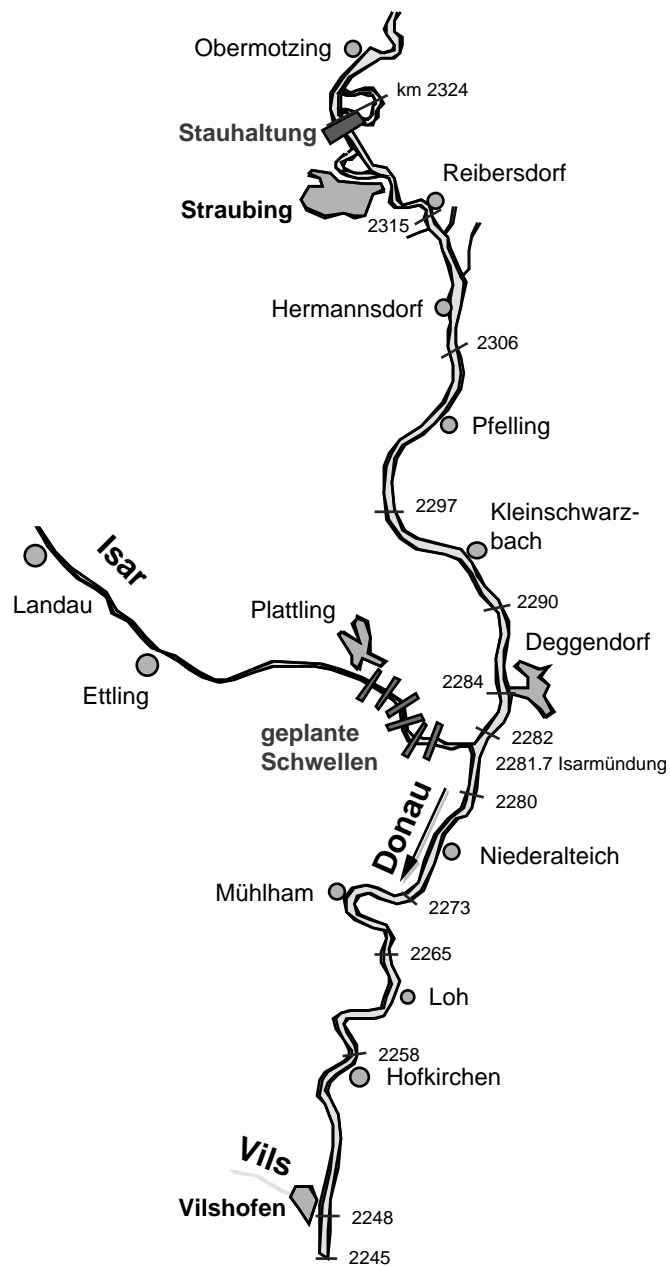


Abb. 1: Übersicht über die Untersuchungsstrecke.

Mit dem vorliegenden Gutachten soll beurteilt werden, ob sich die Donau in Zukunft zwischen Straubing und Vilshofen wegen des reduzierten Geschiebeeintrages eintiefen wird oder nicht. In Absprache mit dem Auftraggeber wird von folgenden Randbedingungen ausgegangen:

- kein Geschiebedurchgang durch die Staustufe Straubing,
- kein Geschiebeeintrag von der Isar in die Donau,
- keine Berücksichtigung der Einwirkung der Schifffahrt,
- keine Berücksichtigung von zukünftigen Regelungs- und anderen Bauwerken und
- keine Berücksichtigung der Auswirkungen eines allfälligen Sohldurchschlages in das Tertiär.

Weiter wurde vereinbart, dass sich das Gutachten auf die Grundlagen abstützen soll, welche im Rahmen der Untersuchungen der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) erhoben wurden und im flussmorphologischen Statusbericht vom Juli 1998 zusammengefasst sind. Die aus der Vielzahl der Unterlagen benützten Daten sind im Anhang zusammengestellt.

2 Allgemeines zum Geschiebetransport

Ob ein Flussabschnitt auflandet, sich eintieft oder stabil ist, hängt vom Verhältnis *Geschiebeeintrag* zu *Transportvermögen* und von der *Deckschichtausbildung* (Pflasterung) ab. Mit Hilfe von Abbildung **Fehler! Unbekanntes Schalterargument.**, in welcher der Geschiebetransport in Abhängigkeit vom Abfluss vereinfacht dargestellt ist, sollen die grundsätzlichen Prozesse näher erläutert werden. Überschreitet der Abfluss den Wert Q_O (Transportbeginn), so kann Geschiebe transportiert werden. Aber erst bei Abflüssen über Q_D wird die Deckschicht aufgerissen. Ist bei Abflüssen über dem Grenzabfluss Q_D die Geschiebezufuhr (Bereich I) kleiner als die Transportkapazität (Kurve A), so kann das Fliessgewässer Geschiebe aus der Sohle erodieren und es tieft sich ein. Ist hingegen die Geschiebezufuhr (Bereich II) grösser als die Transportkapazität (Kurve B), so ist das Transportvermögen überschritten, das überschüssige Geschiebe wird abgelagert und das Flussbett landet auf. Liegt die Geschiebezufuhr zwischen den beiden Kurven A

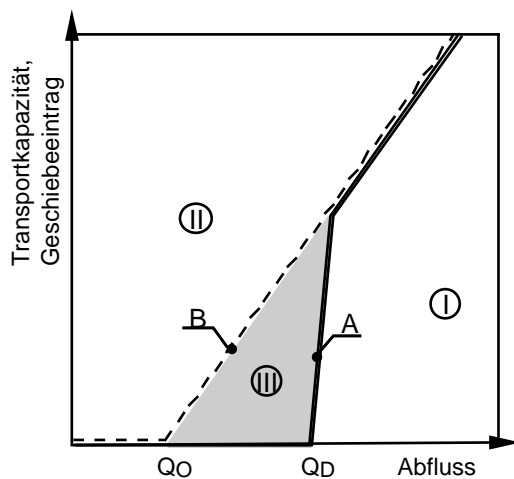


Abb. 3:

Vereinfachte Darstellung einer Geschiebefunktion (Erläuterungen siehe Text).

und B (Bereich III), so schützt die Deckschicht das Flussbett vor einer Eintiefung. Dies gilt allerdings nur für eine vollständig ausgebildete Deckschicht. Sonst kann sich das Flussbett solange eintiefen, bis sich eine der hydraulischen Belastung angepasste Deckschicht ausgebildet hat. Das Ausmass dieser Erosion ist in der Regel begrenzt.

Bei dieser vereinfachten Modellvorstellung wird davon ausgegangen, dass für den Transportbeginn der mittlere Korndurchmesser d_m und für das Aufreissen der Deckschicht das Verhältnis der Korndurchmesser d_{90} zu d_m repräsentativ ist. Diese Durchmesser beziehen sich jeweils auf das Sohlenmaterial der Unterschicht (US), welche sich unter der Deckschicht (DS) befindet.

In Wirklichkeit sind die Prozesse komplexer. Vor allem das Mass der Abpflasterung kann je nach hydraulischer Belastung der Sohle und morphologischen Prozessen (Erosion, Auflandung) sehr unterschiedlich sein (VAW, 1992). Dabei können innerhalb eines Flussabschnittes alle Übergangsformen zwischen vollständiger Abpflasterung, beispielsweise in den Kolkbereichen, und Ablagerungen von Feinmaterial vorkommen. Erst wenn die Geschiebezufuhr während einer längeren Zeit unterbrochen ist, kann von einer vollständigen Abpflasterung über grosse Bereiche ausgegangen werden.

Weil zwischen Straubing und Vilshofen in Zukunft kein Geschiebe mehr in die Donau eingetragen wird, muss für die Beantwortung der Frage, ob sich die Donau eintiefen wird oder nicht, der Grenzabfluss Q_D möglichst genau bestimmt werden. Ist Q_D grösser als der maximal zu erwartende Abfluss Q_{max} , so ist das Flussbett stabil. Ist Q_D kleiner als Q_{max} , so wird die Deckschicht aufgerissen und die Donau kann sich eintiefen. Das Ausmass einer allfälligen Erosion hängt davon ab, wie häufig respektive wie lange der Grenzabfluss Q_D überschritten wird und um wieviel. Für das vorliegende Gutachten nehmen wir an, dass Q_{max} dem $HW_{100 IST}$ entspricht.

Anstelle der Grenzabflüsse Q_0 und Q_D werden häufig auch die Ausdrücke θ_{cr} und θ_{Dcr} verwendet. θ_{cr} wird als kritische dimensionslose Schubspannung für den Transportbeginn und θ_{Dcr} als kritische dimensionslose Schubspannung der Deckschicht bezeichnet. Die entsprechende Grösse für die hydraulische Belastung der Flusssohle ist die dimensionslose Schubspannung θ , welche auch als

Shields-Parameter bezeichnet wird. Dieser Parameter vergleicht die Kraft, welche das Wasser auf das Flussbett ausübt, mit dem Erosionswiderstand des Sohlenmaterials. Er ist definiert als

$$\theta = \frac{hJ'}{(\rho_s/\rho - 1)d_m}, \quad (1)$$

wobei h die transportwirksame Abflusstiefe ist, J' das Kornreibungsgefälle¹, ρ_s die Dichte des Geschiebes und ρ die Dichte des Wassers. Ist dieses Verhältnis grösser als der Grenzwert θ_{cr} , so kann Geschiebe transportiert werden. Nach Meyer-Peter und Müller (1948) gilt

$$\theta_{cr} = 0.047, \quad (2)$$

und der entsprechende Wert für das Aufbrechen der Deckschicht kann nach Günter (1971) mit

$$\theta_{Dcr} = \theta_{cr} \left(\frac{d_{mDS}}{d_m} \right)^{0.67} \quad (3)$$

bestimmt werden, wobei d_{mDS} der mittlere Durchmesser der Deckschicht ist und näherungsweise gleich d_{90} der Unterschicht gesetzt werden kann.

Für die Beantwortung der Frage, ob sich die Donau in Zukunft eintiefen wird oder nicht, muss also geprüft werden, ob die Ungleichung

$$\theta > \theta_{Dcr} \quad \text{resp.} \quad \frac{hJ'}{(\rho_s/\rho - 1)d_m} > 0.047 \left(\frac{d_{90}}{d_m} \right)^{0.67} \quad (4)$$

erfüllt ist oder nicht. Im Wesentlichen geht es dabei um die Bestimmung respektive die Gegenüberstellung von hydraulischer Belastung und maximalem Erosionswiderstand. Im Folgenden wird θ als Belastung und θ_{Dcr} als Widerstand bezeichnet. Zusätzlich zu diesen Werten ist eine qualitative Beurteilung möglicher Erosionsprozesse erforderlich. Im nächsten Kapitel werden diese kurz beschrieben.

3 Erosionsformen

Ist die Ungleichung (**Fehler! Unbekanntes Schalterargument.**) erfüllt, so kann sich ein Flussbett eintiefen. Die Erosionsformen hängen von der Art des Erosionsprozesses ab. Die im Zusammenhang mit der vorliegenden Fragestellung wichtigsten Erosionsformen sind die *Rotationserosion* (Abb. **Fehler! Unbekanntes Schalterargument.**, oben), die *Parallelerosion* (Mitte) und die *Rückwärtserosion* (unten).

¹ Wenn keine Sohlenformen auftreten, kann das Kornreibungsgefälle dem Energieliniengefälle gleichgesetzt werden.

Bei der *Rotationserosion* erfolgt die Sohleneintiefung in Fließrichtung. Im obersten Streckenabschnitt wird Geschiebe erodiert und in den nächsten Abschnitt eingetragen. Dadurch wird die folgende Strecke temporär gegen Erosion geschützt, sofern die Transportkapazität entlang der gesamten Strecke gleich ist. Nimmt hingegen die Transportkapazität entlang eines Flusses ab, kann das oben erodierte Material im Unterlauf zu temporären Ablagerungen führen. Die Erosion breitet sich in Fließrichtung bis zum nächsten Sohlenfixpunkt, beispielsweise einer Blockrampe, einer Felsstrecke oder einem stabilen Flussabschnitt, aus und zwar solange, bis ein Gleichgewicht erreicht ist. Das neue Gefälle lässt sich näherungsweise mit der Gleichung

$$\frac{hJ'}{(\rho_s/\rho - 1)d_m} = 0.047 \left(\frac{d_{90}}{d_m} \right)^{0.67} \quad (6)$$

bestimmen. Für eine Rotationserosion sind Abflüsse über Q_D notwendig.

Eine *Parallelerosion* kann sich einstellen, wenn der Abfluss zwischen Q_O und Q_D liegt oder wenn die Transportkapazität entlang einer Strecke kontinuierlich zunimmt, so dass das erodierte Material die folgende Strecke nicht vor einer Eintiefung schützen kann. Gleichzeitig muss sich die untere Randbedingung entsprechend abtiefen. Die Eintiefung schreitet so weit fort, bis sich eine dem Abfluss entsprechende Deckschicht ausgebildet hat.

Wird ein Fixpunkt instabil und tieft sich deshalb das Flussbett lokal ein, kann dadurch eine *Rückwärtserosion* ausgelöst werden. Das Ausmass der Eintiefung im Oberwasser entspricht der Absenkung des Fixpunktes.

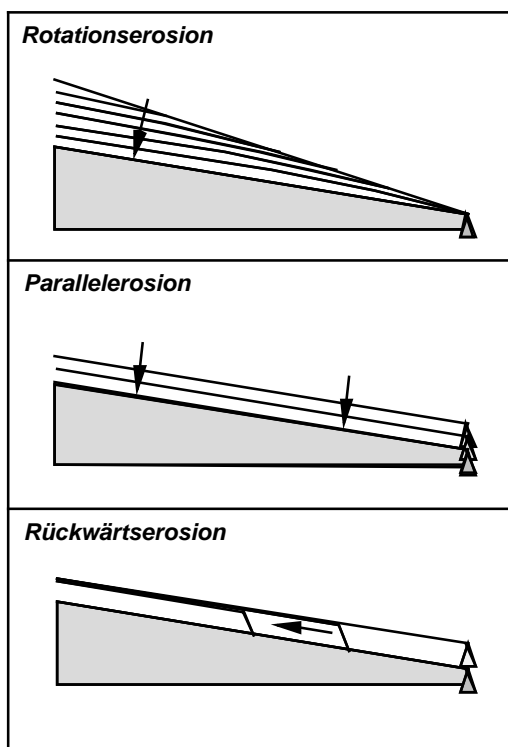


Abb. 5:

Rotations-, Parallel- und Rückwärtserosion.

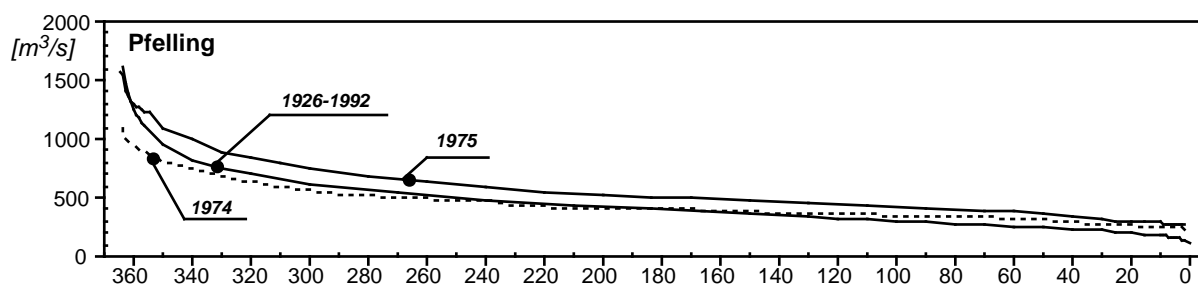
In der Natur überlagern sich in der Regel die Erosionsformen. Die Eintiefungsrate und die Ausdehnung der Erosion in Längsrichtung hängen dabei sehr stark von der Transportkapazität, dem zugeführten Geschiebe und der Flussbettbreite ab. Bei breiten Flüssen sind die Eintiefungsraten in der Regel kleiner als bei schmalen Flüssen (Jäggi, 1992).

4 Charakteristische Daten der Untersuchungsstrecke

Die hydrologischen Kennwerte der Strecke ober- und unterhalb der Isarmündung können aus der Tabelle **Fehler! Unbekanntes Schalterargument.** entnommen werden. In Abb. **Fehler! Unbekanntes Schalterargument.** sind zudem ausgewählte Dauerkurven dargestellt, welche auf den Abflussdaten der Pegelstationen Pfelling und Hofkirchen basieren /4/.

	oberhalb Isarmündung (km 2323.8 bis km 2281.8)	unterhalb Isarmündung (km 2281.7 bis km 2249.0)
HW 100 IST	3450	4130
HNN IST	1400	1815
MW IST	460	635
ENR IST	190	299

Tab. 2: Hydrologische Kennwerte für die Strecke oberhalb und unterhalb der Isarmündung in $\text{m}^3/\text{s} /1/$.



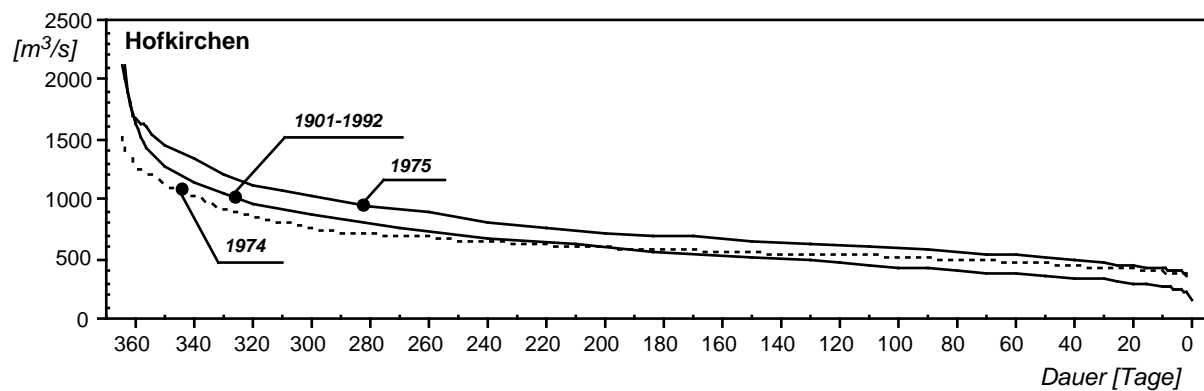


Abb. 7²: Ausgewählte Dauerkurven bei Pfelling und bei Hofkirchen /4/.

Abb. **Fehler! Unbekanntes Schalterargument.** gibt einen Überblick über das Längenprofil, das Wasserspiegelgefälle bei $\text{HNN}_{100 \text{ IST}}$, die für den Geschiebetransport relevante Flussbettbreite sowie die Korndurchmesser d_m und d_{90} der Untersuchungsstrecke. Diese wurde in drei typische Teilstrecken unterteilt, zwei oberhalb und eine unterhalb der Isarmündung:

- obere Teilstrecke: Zusammenfluss Alte / Neue Donau (km 2319.0) bis Pfelling (km 2303.5)
- mittlere Teilstrecke: Pfelling (km 2303.5) bis Isarmündung (km 2281.7)
- untere Teilstrecke: Isarmündung (km 2281.7) bis Hofkirchen (km 2256.5).

² Zu Gunsten einer besseren Lesbarkeit sind die meisten Abbildungen im Anhang noch einmal im Format A4 dargestellt (siehe Inhaltsverzeichnis).

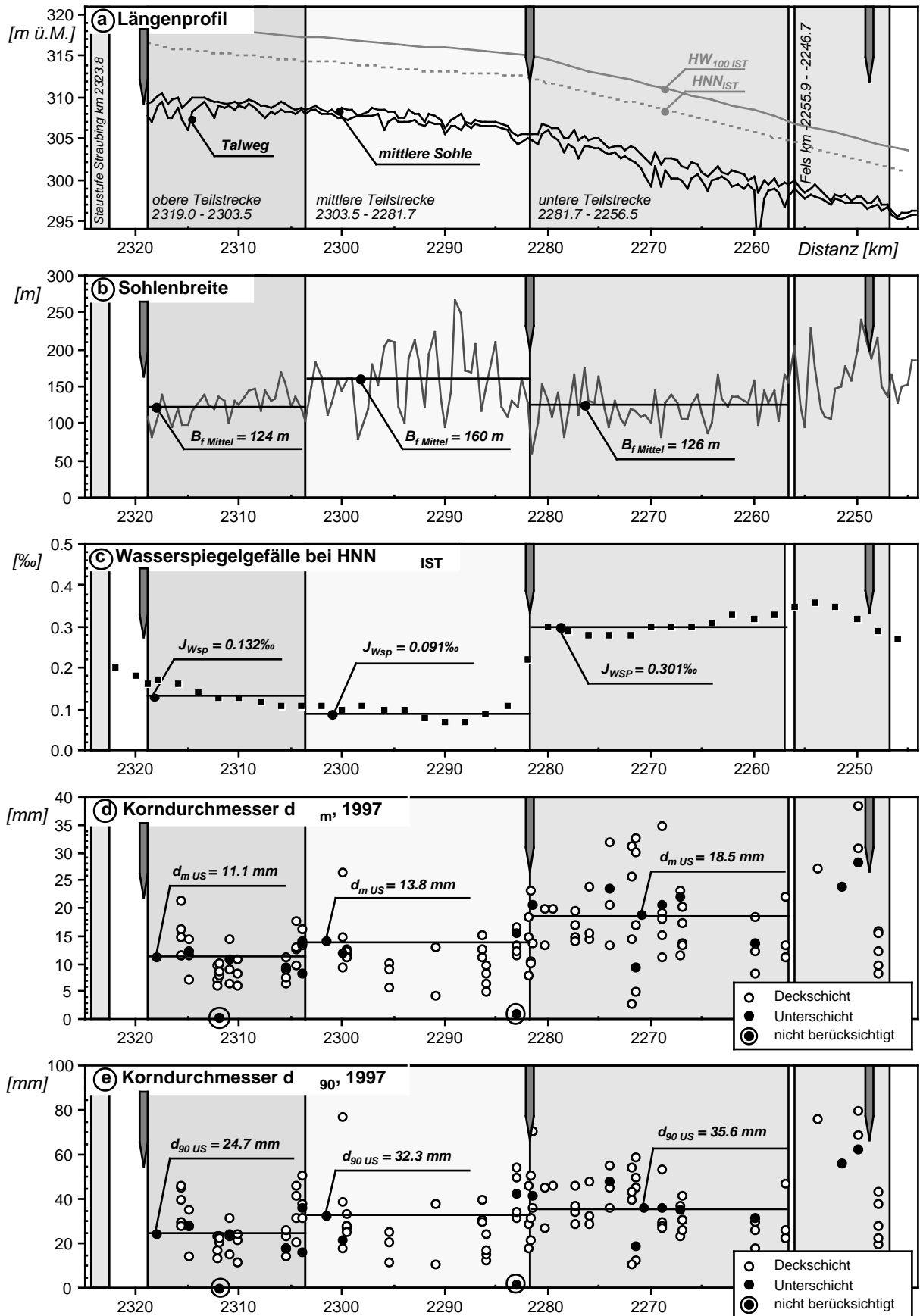


Abb. 9: Längenprofil, Sohlenbreite, Wasserspiegelgefälle $HW_{100 IST}$, Flussbettbreiten sowie Korndurchmesser d_m und d_{90} .

Die Mittelwerte der charakteristischen Daten dieser Teilstrecken sind in Tabelle **Fehler! Unbekanntes Schalterargument.** zusammengefasst. Die für den Geschiebetransport massgebende Flussbettbreite wurde mit Hilfe der zur Verfügung gestellten digitalen Querprofile bestimmt /3/. Die Daten für das Sohlen- und das Wasserspiegelgefälle sowie für die Abflusstiefen wurden mit Hilfe von Wasserspiegelberechnungen ermittelt. Die Abflusstiefen beziehen sich jeweils auf die mittlere Sohle.

Teilstrecke	obere	mittlere	untere
Bereich [km]	2319.0 - 2303.5	2303.5 - 2281.7	2281.7 - 2256.5
Sohlengefälle ^{1) 3)} [‰]	0.063 (0.062)	0.131 (0.114)	0.302 (0.287)
Wasserspiegelgefälle ^{2) 3)} bei HW ₁₀₀ IST [‰]	0.131 (0.149)	0.095 (0.099)	0.314 (0.308)
Wasserspiegelgefälle ^{2) 3)} bei HNN _{IST} [‰]	0.110 (0.132)	0.010 (0.091)	0.308 (0.301)
transportwirksame Flussbettbreite ³⁾ [m]	124	160	126
Abflusstiefe ^{1) 2) 3)} bei HW ₁₀₀ IST [m]	8.88 (9.07)	8.45 (8.95)	8.07 (8.79)
Abflusstiefe ^{1) 2) 3)} bei HNN _{IST} [m]	5.93 (6.07)	5.67 (6.05)	5.49 (6.03)
d _m [mm] Unterschicht ⁴⁾ [Anzahl Proben]	11.1 [5]	13.8 [2]	18.5 [6]
d ₉₀ [mm] Unterschicht ⁴⁾ [Anzahl Proben]	24.6 [5]	32.3 [2]	35.6 [6]
d _m [mm] Deckschicht ⁴⁾ [Anzahl Proben]	11.2 [31]	11.8 [27]	18.2 [43]
d ₉₀ [mm] Deckschicht ⁴⁾ [Anzahl Proben]	27.9 [31]	30.5 [27]	36.6 [43]
d _m [mm] Unter- und Deckschicht ⁴⁾ [Anzahl Proben]	11.2 [36]	12.0 [29]	18.2 [49]
d ₉₀ [mm] Unter- und Deckschicht ⁴⁾ [Anzahl Proben]	27.5 [36]	30.6 [29]	36.5 [49]
d _m [mm] Unter- und Deckschicht ⁴⁾ , Standardabweichung	3.6	4.4	7.6
d ₉₀ [mm] Unter- und Deckschicht ⁴⁾ , Standardabweichung	10.4	14.4	12.5

Tab. 4: Mittelwerte der charakteristischen Parameter der Teilstrecken (1): bezogen auf die mittlere Sohle, 2): aus Wasserspiegelberechnungen, 3): aus digitalen Querprofilen, 4): Proben 1997). Die Werte, welche bei diesen Parametern in runden Klammern stehen, stammen aus dem hydraulischen Längenprofil /1/. Als Bezugsgrösse wurde die Flussachse gewählt (siehe Fussnote 5, Seite 12).

Die Angaben für das Sohlenmaterial wurden aus den verfügbaren Unterlagen /2/ entnommen. Darin sind eine Vielzahl von Proben der Unter- und Deckschicht aus Furten und Kolken, von Kiesbänken und Einflussbereichen von Buhnen enthalten. Die Abbildungen **Fehler! Unbekanntes Schalterargument.** d) und e) zeigen die Streuung der Korndurchmesser d_m³ und d₉₀. Aus der Zusammenstellung in Tabelle **Fehler! Unbekanntes Schalterargument.** geht hervor, dass es kaum Unterschiede zwischen den Deckschicht- und den Unterschichtproben gibt. Teilweise sind die Deckschichtproben sogar eher

³ Es wird davon ausgegangen, dass der mittlere Korndurchmesser d_m nach dem Verfahren von Meyer-Peter und Müller (1948) ermittelt wurde. Weil aus den Proben von 1988 nicht hervorgeht, ob es sich um Material von der Deckschicht oder Unterschicht handelt, wurden nur die Daten von 1997 verwendet. Zudem waren von den Proben von 1988 die Korndurchmesser d_m nicht verfügbar.

feiner als die Unterschichtproben. Von allen Sohlenproben wurde auch noch die Standardabweichung der Durchmesser d_m und d_{90} ermittelt. Auf die Bestimmung dieser Werte für die Unterschicht allein wurde verzichtet, weil für die einzelnen Teilstrecken nur wenige Proben zur Verfügung standen.

5 Methodik

5.1 Übersicht

Für die Beantwortung der prinzipiellen Frage, ob die Donau bei reduziertem Geschiebeeintrag erodiert, konnte im Rahmen dieses Gutachtens keine Langzeitsimulation durchgeführt werden (siehe Abschnitt 5.4). Die Beurteilung erfolgt darum aufgrund eines Vergleichs der hydraulischen Belastung respektive der dimensionslosen Schubspannung bei grossen Abflüssen mit der kritischen Belastung für das Aufreissen der Deckschicht, wobei zwei Konzepte angewendet wurden. Einerseits wurde mit einem numerischen Modell in jedem Querprofil die Belastung ermittelt (Abschnitt 5.2), andererseits wurde das Erosionspotential aufgrund der charakteristischen Parameter der drei Teilstrecken global abgeschätzt (Abschnitt 5.3). Bei der globalen Betrachtung wurde auch der Einfluss der Streuung der Naturdaten berücksichtigt. Die Berechnungen wurden sowohl mit *Mittelwerten*, wie beim numerischen Modell, als auch mit Extremwerten durchgeführt.

5.2 Detaillierte Ermittlung der Belastung mit Hilfe eines numerischen Modells

Allgemeines

Dank den Entwicklungen in der Computertechnik werden im Flussbau vermehrt numerische Modelle eingesetzt. Ein Beispiel ist das von der BAW an der Donau verwendete Programm SEDICOUP. Diese Computerprogramme ermöglichen eine sehr differenzierte Erfassung des Flusssystems. Dabei spielt natürlich das Mass der Auflösung respektive der Abstand der Querprofile eine wichtige Rolle. Der Hauptvorteil der numerischen Modelle besteht aber insbesondere darin, dass die morphologischen Prozesse nachvollzogen werden können, das heisst, dass die Sohlenveränderungen und die Sortierprozesse simuliert und Prognosen über die zukünftige Sohlenentwicklung gemacht werden können.

Für die vorliegende Beurteilung der Erosionsproblematik der Donau wurde das Programm MORMO⁴ eingesetzt. Das Programm ist ein eindimensionales, quasi-stationäres, explizites Sedimenttransportmodell. Die Geschiebefrachten können sowohl fraktionsweise (Mehrkornmodell) als auch aufgrund der Angabe eines mittleren Korndurchmessers (3-Korn-Modell) berechnet werden. Das Modell wurde in den vergangenen Jahren an zahlreichen Flüssen in Europa, insbesondere in der Schweiz, eingesetzt.

⁴ Das Programm MORMO wurde an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich aufgebaut und wird heute vom Ingenieurbüro Hunziker&Zam weiterentwickelt.

Für die Berechnung des Geschiebetransports können verschiedene Formeln gewählt werden. Ausgehend von den Untersuchungen von Hunziker (1995) und Zarn (1997) wurde in den letzten Jahren aber vor allem die Formel von Meyer-Peter und Müller (1948) weiterentwickelt.

Mit dem Programm MORMO wurde die Strecke vom Zusammenfluss der *Alten Donau* mit der *Neuen Donau* bei km 2219 bis Vilshofen bei km 2245 modelliert. Die Berechnungen wurden mit dem 3-Korn-Modell durchgeführt, bei welchem die Transportkapazität aufgrund des mittleren Korndurchmessers des laufenden Geschiebes ermittelt wird. Die Deckschichtbildungsprozesse werden hingegen aufgrund der Kornverteilung des Unterschichtmaterials, repräsentiert durch d_m und d_{90} , beurteilt. Der Einsatz des Mehrkornmodells ist im Rahmen dieses begrenzten Auftrages nicht möglich gewesen. Das Modell wurde darum nicht als Prognoseinstrument eingesetzt, sondern zur Ermittlung der hydraulischen Belastung.

Modellaufbau - Konzept

Bei der Modellerstellung wurde von folgendem sedimentologischen Konzept ausgegangen:

- Die Messungen der BAW geben Hinweise darauf, dass die Geschwindigkeitsunterschiede innerhalb eines Querprofils kleiner sind, als sie aufgrund der Abflusstiefen im Kolk- resp. Bankbereich zu erwarten wären. Die Anwendung der schon von Meyer-Peter und Lichtenhahn (1963) propagierten Streifenmethode, bei welcher das Querprofil in Streifen mit unterschiedlichen Abflusstiefen unterteilt wird, kann darum zu grosse Schubspannungen ergeben. Eine analoge Feststellung wurde auch am Alpenrhein (Zarn et al., 1995) gemacht, dessen Flussmorphologie von alternierenden Bänken geprägt ist. Die Berechnung der Schubspannung aufgrund des hydraulischen Radius, quasi die klassische Berechnungsart, dürfte hingegen zu kleine Schubspannungen ergeben. Für die Donau wurde darum das Konzept von Zarn (1997) übernommen. Die Berechnung der Abflusstiefe erfolgt in einem aufgrund von morphologischen Kriterien modifizierten Querprofil und berücksichtigt auch den Wandeinfluss.
- Für die heutigen Verhältnisse dürfen die Geschiebefrachten nicht aufgrund der mittleren Korndurchmesser d_m der Unterschicht berechnet werden. Wie die Felduntersuchungen der BAW zeigen, hat die Donau keine ausgeprägte Deckschicht und das laufende Geschiebe weist mehrheitlich einen kleineren mittleren Korndurchmesser auf als das Unterschichtmaterial. Mit zunehmendem Abfluss nähert sich der mittlere Korndurchmesser des laufenden Materials aber dem entsprechenden Wert der Unterschicht an. Der Shields-Parameters θ , welcher die massgebende unabhängige Variable bei der Bestimmung der Transportkapazität ist, muss deshalb mit einem feineren d_m berechnet werden. Mit einer Nachrechnung von gemessenen Geschiebefrachten kann dieser Korndurchmesser geeicht werden.
- Die Vergleiche von gemessenen und berechneten Geschiebefrachten sowie von gemessenen und geeichten mittleren Korndurchmessern des laufenden Materials geben Hinweise darauf, ob das angenommene Kräfteverhältnis zwischen Schubspannung und Erosionswiderstand den effektiv vorkommenden Verhältnissen entspricht.

Modellbetrieb

Zuerst muss das numerische Modell geeicht werden. Anschliessend können mit dem geeichten Modell die Shields-Parameter für den heutigen sowie den zukünftigen Zustand ohne Geschiebeeintrag berechnet werden. Diese Berechnungen basieren auf folgenden Überlegungen:

- Im *heutigen* Zustand wird immer noch Geschiebe in die Donau eingetragen. Das transportierte Material dürfte einen feineren mittleren Korndurchmesser als das Sohlenmaterial aufweisen. Die dimensionslosen Schubspannungen (Gleichung 1) sind wegen dieses feineren transportierten Geschiebes relativ hoch und ergeben einen oberen Grenzwert für die Belastung.
- Der Geschiebeeintrag in die Donau wird in *Zukunft* auf Null abnehmen. Als Quelle für die Mobilisierung von Geschiebe steht dann nur noch die Sohle zur Verfügung. In Zukunft dürfte sich eine ausgeprägte Deckschicht ausbilden und das transportierte Material eher gröber sein als heute. Die Berechnung des Shields-Parameters aufgrund dieses gröberen Sohlenmaterials ergibt kleinere dimensionslose Schubspannungen. Diese entsprechen einem unteren Grenzwert der zu erwartenden Belastung. Dieser Grenzwert ist massgebend für die Beurteilung der Sohlstabilität bei vollkommener Abpflasterung.

5.3 Globale Betrachtung mit Hilfe von charakteristischen Grössen in drei Teilstrecken

Bei der globalen Betrachtung wurden die relevanten Daten aus den verfügbaren Grundlagen entnommen (/1/ und /2/). Für die Ermittlung der Belastung in den drei Teilstrecken wurden die Abflusstiefen aus den Angaben im hydraulischen Längenprofil und das Gefälle aus den Wasserspiegeln für den Abfluss $HW_{100\text{ IST}}$ ermittelt. Für jeden Parameter wurden für die untersuchte Teilstrecke Mittelwerte gebildet (Tab. **Fehler! Unbekanntes Schalterargument.**). Zusätzlich wurden mit Gleichung (**Fehler! Unbekanntes Schalterargument.**) auch noch die Grenzgefälle für eine stabile Sohlenlage bei einer Belastung entsprechend dem $HW_{100\text{ IST}}$ abgeschätzt. Damit kann ein stark vereinfachtes Längenprofil in einem stabilen Endzustand konstruiert werden.

Um die Streuungen der Naturdaten berücksichtigen zu können, wurden Mittel- und Extremwerte für die Belastung (hoch) und den Erosionswiderstand (gering) verwendet. Die *Mittelwertbetrachtung* beruht auf:

- der mittleren Abflusstiefe (Differenz Wasserspiegel zu Kote Flussachse⁵)
- den Mittelwerten der Durchmesser d_m und d_{90} der Unterschichtproben von 1997.

Die *Extremwertbetrachtung* beruht auf:

- der maximalen Abflusstiefe (Differenz Wasserspiegel zu Talweg)
- den Mittelwerten der Durchmesser d_m und d_{90} abzüglich der Standardabweichung⁶ aller Proben von 1997.

⁵ Weil wir uns bei dieser Betrachtung auf die verfügbaren Daten abstützten, wurde als Referenz für die Bestimmung der Abflusstiefe die Kote der Flussachse gewählt /1/. Diese liegt im Durchschnitt etwas tiefer als die mittlere Sohle, welche aus den eigenen Berechnungen resultierte. Wird die Kote der Flussachse als Referenz gewählt, so werden gegenüber einer Betrachtung mit der mittleren Sohle grössere Abflusstiefen und damit grössere Belastungen ermittelt.

Falls die Mittelwerts- *und* die Extremwertsbetrachtung dasselbe morphologische Verhalten anzeigen, sind eindeutige Aussagen möglich. Ist dies aber nicht der Fall, so kann die Erosionsproblematik im Rahmen dieses Gutachtens nicht abschliessend beurteilt werden.

5.4 Grenzen der Methoden

Bei der Interpretation der Resultate ist zu beachten, dass der Aussagekraft der bei diesem Gutachten verwendeten Methoden respektive der Grundlagendaten gewisse Grenzen gesetzt sind. Bei einer weitergehenden, vertieften Bearbeitung wären folgende Untersuchungen sinnvoll:

Belastung

- Zur Abklärung der Frage, welcher Parameter in der Mittelwertshydraulik als massgebende Abflusstiefe eingesetzt werden muss (hydraulischer Radius, mittlere Abflusstiefe, maximale Abflusstiefe), sollten für repräsentative Strecken die dimensionslosen Schubspannungen mit Hilfe von 2-dimensionalen Abflussmodellen bestimmt werden.

Widerstand

- Von den Sedimentdaten von 1997 stammen insgesamt nur 15 Proben aus der Unterschicht. Aus den Sedimentdaten von 1988 geht nicht hervor, ob es sich um Proben aus der Unter- oder Deckschicht handelt. Es sollten zusätzliche Unterschichtproben entnommen werden, welche regelmässig über die Untersuchungsstrecke verteilt sind.
- Der mittlere Korndurchmesser der maximal möglichen Deckschicht d_{mDS} sollte mit dem Ansatz von Gessler (1965) oder Günter (1971) bestimmt werden. Dazu muss aber die Kornverteilung der Unterschicht verfügbar sein.

Geschiebeeintrag aus der Isar

- Die Kornverteilung des von der Isar eingetragenen Geschiebes hat einen Einfluss auf die morphologischen Prozesse in der Donau und sollte darum möglichst genau bekannt sein.

Stabile Sohlenlage ohne Geschiebeeintrag in die Untersuchungsstrecke

- Mit der gewählten Methodik können keine Prozesse simuliert, sondern nur Momentan- oder Endzustände analysiert werden. Um Aussagen über morphologische Prozesse und damit auch über die zeitliche Entwicklung der Sohlenveränderungen machen zu können, müsste einerseits das Modell fraktionsweise betrieben werden, und andererseits müssten Langzeitsimulationen über mehrere Jahrzehnte durchgeführt werden. Im Rahmen dieses Gutachtens sind solche Untersuchungen nicht vorgesehen. Eine entsprechende Arbeit wurde von der BAW mit dem Programm SEDICOUP ausgeführt.

⁶ Der Bereich Mittelwert \pm Standardabweichung umfasst etwa 2/3 aller Werte. Rund 1/6 der Proben sind feiner als die bei der Extremwertbetrachtung verwendeten Durchmesser.

6 Resultate

6.1 Eichung des numerischen Modells

Zuerst wurde das numerische Modell anhand von „gemessenen“⁷ und berechneten Geschiebefrachten geeicht. Dazu wurden die Dauerkurven der Jahre 1974 und 1975 der Pegelstationen Pfelling und Hofkirchen (Abb. **Fehler! Unbekanntes Schalterargument.**) ausgewählt. Im Jahr 1974 lagen die grossen, für den Geschiebetransport relevanten Abflüsse unter dem langjährigen Mittelwert und die kleinen darüber. Im Jahr 1975 wurden Abflüsse registriert, welche deutlich grösser als der langjährige Mittelwert sind. Abbildung **Fehler! Unbekanntes Schalterargument.** zeigt den Vergleich der von MORMO berechneten Geschiebefrachten mit den von der BAW berechneten Frachten. Obwohl lokal grössere Abweichungen festgestellt werden können, zeigen die beiden Simulationen qualitativ die gleichen Charakteristiken des Geschiebehaushaltes der Donau auf.

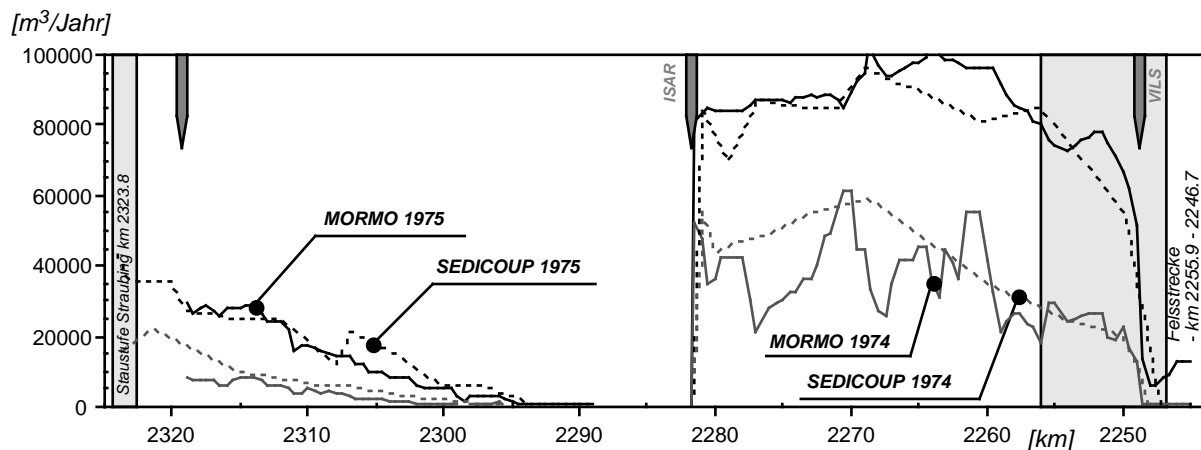


Abb. 13: Geschiebefrachten, welche mit den Programmen MORMO und SEDICOUP /5/ berechnet wurden.

In der Eichphase wurde der mittlere Korndurchmesser des laufenden Materials so angepasst, dass eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen den von MORMO respektive SEDICOUP berechneten Frachten resultierte. Der Vergleich zwischen den schliesslich gewählten mittleren Korndurchmessern mit den bei den Pegeln Pfelling und Hofkirchen gemessenen mittleren Korndurchmessern zeigt ebenfalls eine gute Übereinstimmung (Abb. **Fehler! Unbekanntes Schalterargument.**). Wir schliessen daraus, dass das aufgestellte numerische Modell das morphologisch und sedimentologisch relevante Kräfteverhältnis zwischen Belastung und Widerstand zufriedenstellend nachvollziehen kann und damit für die Beurteilung möglicher zukünftiger Sohlenveränderungen zur Verfügung steht.

⁷ Weil die mit dem Programm SEDICOUP ermittelten Geschiebefrachten geeicht wurden, können sie als Referenz für die im Rahmen dieses Gutachtens durchgeführte Modelleichung benutzt werden.

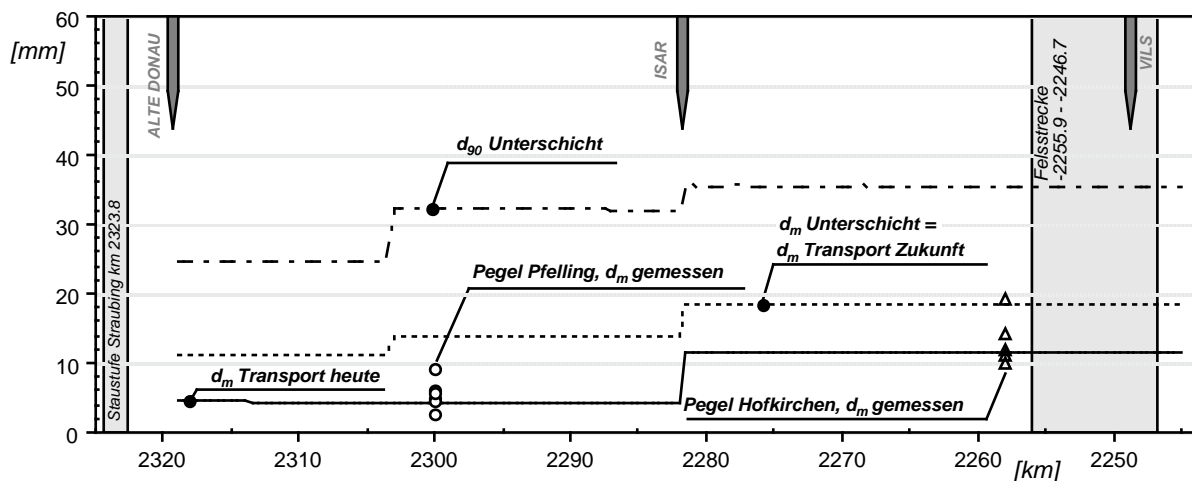


Abb. 15: Vergleich von gemessenen d_m und im numerischen Modell verwendeten Korndurchmessern.

6.2 Resultate der Berechnungen und Beurteilung des Erosionspotentials

Abb. **Fehler! Unbekanntes Schalterargument.** stellt die mit dem numerischen Modell berechneten dimensionslosen Schubspannungen θ für die Abflüsse HNN_{IST} (1400/1815 m^3/s , Tab. **Fehler! Unbekanntes Schalterargument.**) und $HW_{100 IST}$ (3450/4130 m^3/s) dar. Die maximal mögliche Belastung ist bei den heutigen Verhältnissen zu erwarten (θ , Belastung heute in Abb. **Fehler! Unbekanntes Schalterargument.**), weil noch keine gut ausgebildete Deckschicht vorhanden ist und das transportierte Material feiner als die Unterschicht ist (Seite 13). Die minimale Belastung ist bei den zukünftigen Verhältnissen, wenn das transportierte Geschiebe mit demjenigen der Unterschicht identisch ist, zu erwarten (θ , zukünftige Belastung in Abb. **Fehler! Unbekanntes Schalterargument.**). In Tabelle **Fehler! Unbekanntes Schalterargument.** sind die Resultate der globalen Betrachtung für die drei Teilstrecken zusammengefasst, welche mit denjenigen der numerischen Berechnungen übereinstimmen. Aus dem Vergleich von θ und θ_{DCr} nach Günter (1971, Gleichung **Fehler! Unbekanntes Schalterargument.**) kann auf das zukünftige Erosionspotential der Donau geschlossen werden:

- *obere Teilstrecke:* Bei unterbundener Geschiebezufuhr wird im obersten Abschnitt dieser Teilstrecke eine Rotationserosion einsetzen. Gleichzeitig mit der Sohlenerosion wird sich auch die Deckschicht vergrößern. Diese Deckschichtbildungsprozesse führen dazu, dass es immer grössere Abflüsse braucht, um noch eine Erosion auszulösen. Eine Stabilisierung ist trotzdem erst bei einem reduzierten Gefälle zu erwarten.
- *mittlere Teilstrecke:* Die hydraulische Belastung ist in der mittleren Teilstrecke geringer als in der oberen Teilstrecke. Bei einer voll entwickelten Deckschicht wäre, selbst mit der Extremwertbetrachtung, bereits bei den heutigen Gefällsverhältnissen die Sohle stabil. Da dies jedoch nicht der Fall ist, muss bis zur vollständigen Abpflasterung noch mit einer Eintiefung (analog dem von Gessler 1965 untersuchten Fall der Parallelerosion) gerechnet werden. Bei der Beurteilung dieser

Prozesse ist zu berücksichtigen, dass das transportierte Material vorübergehend auch feiner sein kann als das Unterschichtmaterial und dass damit die Entwicklung der Deckschicht behindert wird.

- *untere Teilstrecke*: Die hohen dimensionslosen Schubspannungen zeigen, dass bei einer Abnahme des Geschiebeeintrages von der Isar mit einer Erosion zu rechnen ist. Vorübergehend, bis zur Bildung einer gröberen Deckschicht, werden auch Hochwasser im Bereich von HNN_{IST} zur Eintiefung beitragen. Da die Rotationserosion vermutlich um die als Fixpunkt wirkende Felsstrecke bei Vilshofen (Abb. **Fehler! Unbekanntes Schalterargument.**) erfolgt, ist langfristig mit grösseren Sohlenveränderungen im Bereich der Isarmündung zu rechnen.

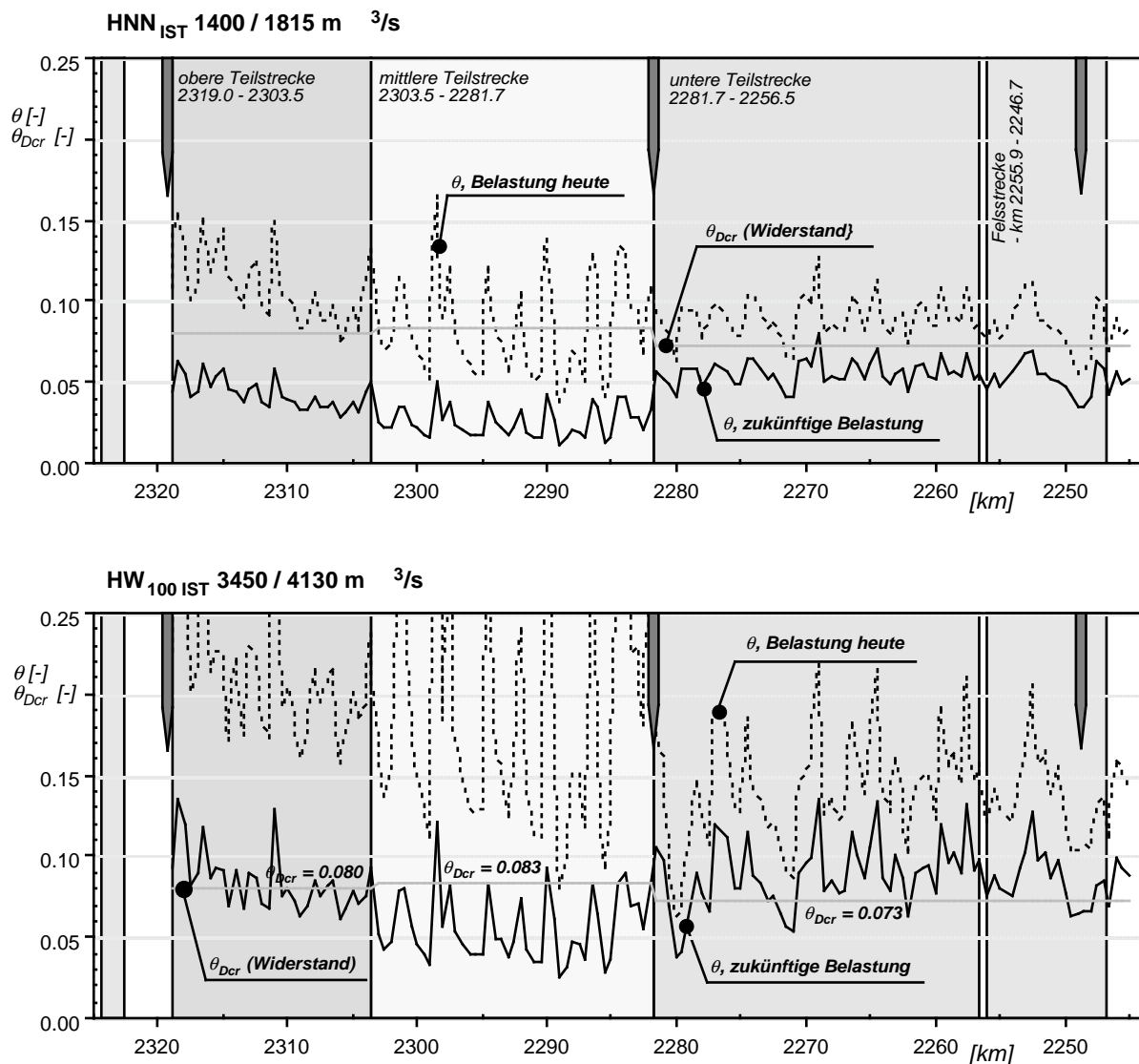


Abb. 20: *Detaillierte Betrachtung:* Vergleich der Belastung θ mit dem Widerstand θ_{Dcr} für das Aufbrechen der Deckschicht für die Abflüsse HNN_{IST} (oben) und HW_{100} IST (unten).

Teilstrecke	obere	mittlere	untere
Bereich [km]	2319.0 - 2303.5	2303.5 - 2281.7	2281.7 - 2256.5
Mittelwerte			
Belastung θ [-]	0.074	0.039	0.089
Widerstand θ_{Dcr} [-]	0.080	0.083	0.073
Erosion	nein	nein	ja
Stabiles Gefälle mit Deckschicht [o/oo]	0.161	0.211	0.253
Gefällsreduktion zu heute [o/oo]			-0.055
Extremwerte			
Belastung θ [-]	0.122	0.076	0.174
Widerstand θ_{Dcr} [-]	0.081	0.078	0.081
Erosion	ja	nein	ja

Tab. 9: Globale Betrachtung:

Belastung und Erosionswiderstand der drei Teilstrecken für das $HW_{100\text{ IST}}$. Die unter **Mittelwerte** aufgeführten θ und θ_{Dcr} -Werte können mit den entsprechenden Werten in Abb. **Fehler! Unbekanntes Schalterargument.**, untere Darstellung, verglichen werden (θ mit θ , zukünftige Belastung).

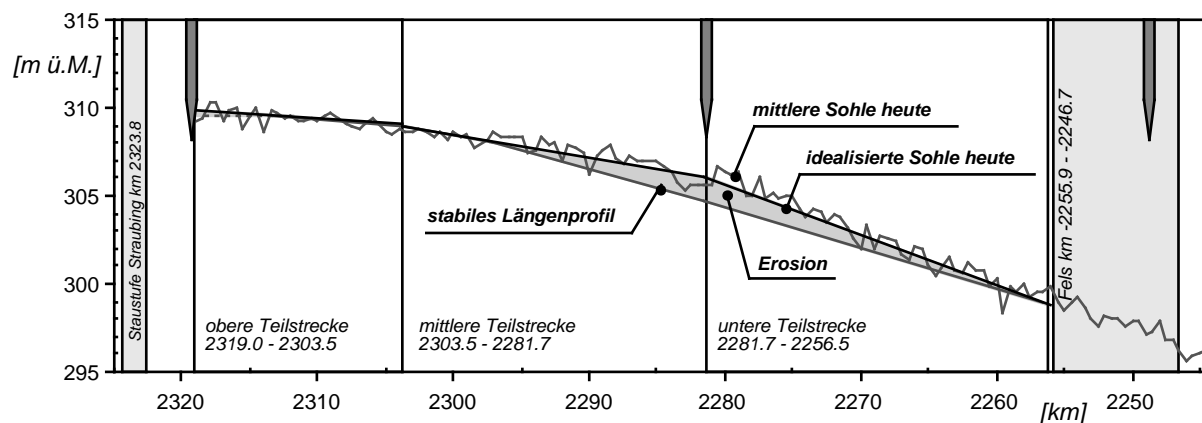


Abb. 22: Theoretisches Längenprofil basierend auf den Grenzgefällen der drei Teilstrecken (siehe auch Text).

Die Sohleneintiefung der unteren Teilstrecke hat auch Auswirkungen auf die mittlere Teilstrecke. Längerfristig ist gemäss der globalen Betrachtung (Mittelwerte) mit einer Eintiefung des Isarmündungsbereichs um rund 1.5 m zu rechnen. Dies führt zu einer Rückwärtserosion in der mittleren Strecke. In Abbildung **Fehler! Unbekanntes Schalterargument.** ist ein entsprechendes Längenprofil qualitativ dargestellt. Weil das theoretische Gleichgewichtsgefälle dieser Strecke steiler als das heutige Gefälle ist, wird sich kein klassischer Rückwärtserosionsprozess einstellen, wie er in Abbildung **Fehler! Unbekanntes Schalterargument.** dargestellt ist. Bei der Darstellung in Abb. **Fehler! Unbekanntes Schalterargument.** sind die Wirkung von lokal unterschiedlichen Erosionswiderständen, wie sie

beispielsweise Querwerke oder Felsaufschlüsse darstellen, und die beim Deckschichtbildungsprozess auftretende Parallelerosion nicht berücksichtigt. Das Ausmass der Parallelerosion dürfte vermutlich im Dezimeterbereich liegen.

7 Zusammenfassung

Das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie erwartet, dass der Geschiebeeintrag in die Donau zwischen Straubing und Vilshofen in Zukunft auf Null abnehmen wird. Die Gründe dafür sind die kürzlich erstellte Staustufe Straubing, welche den Geschiebetransport in der Donau unterbricht, sowie die Massnahmen zur Bekämpfung der Erosion in der Isar. Das vorliegende Gutachten untersucht, ob sich die Donau unter diesen Voraussetzungen in Zukunft eintiefen wird oder nicht. Dazu wurde die hydraulische Belastung, welche einerseits mit dem Simulationsprogramm MORMO und andererseits global mit Mittelwerten für drei Teilstrecken bestimmt wurde, mit dem Erosionswiderstand der Deckschicht verglichen.

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 Hochwasser werden zur Eintiefung der Donau zwischen Straubing und Vilshofen beitragen.

unter Mitarbeit von M. Kokschi, Dipl. Ing. Univ.

Aarau, 12. Februar 1999

Hunziker&Zarn AG
Ingenieurbüro für Fluss- und Wasserbau

Dr. Roni Hunziker

Dr. Benno Zarn

Verwendete Grundlagen**Literatur**

- Meyer-Peter, E.; Müller, R. (1948): Formulas for Bed-Load Transport; IAHSR, Stockholm 7-9.6.1948, 1-26.
- Meyer-Peter, E.; Lichtenhahn, C. (1963): Altes und Neuere über den Flussbau unter der besonderen Berücksichtigung des sanktgallischen Rheintales; Eidg. Departement des Innern, Veröffentlichung des Eidg. Amtes für Strassen- und Flussbau.
- Gessler, J. (1965): Der Geschiebetriebbeginn bei Mischungen untersucht an natürlichen Abpflästerungserscheinungen in Kanälen; Mitteilung Nr. 69 der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich.
- Günter, A. (1971): Die kritische mittlere Sohlenschubspannung bei Geschiebemischungen unter Berücksichtigung der Deckschichtbildung und der turbulenzbedingten Sohlenschubspannungsschwankungen, Mitteilung Nr. 3 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.
- Hunziker, R. (1995): Fraktionsweiser Geschiebetransport, Mitteilung Nr. 138 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.
- Jäggi, M. (1992): Sedimenthaushalt und Stabilität von Flussbauten; Mitteilung Nr. 119 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.
- VAW (1992): Proceedings of the International Grain Sorting Seminar, Centro Stefano Franscini, Monte Verità, Ascona, 21.-26. October 1991; Mitteilung Nr. 117 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.
- Zarn, B.; Oplatka, M.; Pellandini, St.; Mikos, M; Hunziker, R.; Jäggi, M. (1995): Geschiebehaushalt Alpenrhein; Neue Erkenntnisse und Prognosen über die Sohlenveränderungen und den Geschiebetransport; Mitteilung Nr. 139 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.
- Zarn, B. (1997): Einfluss der Flussbettbreite auf die Wechselwirkung zwischen Abfluss, Morphologie und Geschiebetransportkapazität; Mitteilung Nr. 154 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.

Berichte, Pläne und Dokumente (unveröffentlicht)

- Bundesanstalt für Wasserbau, Donauausbau Straubing - Vilshofen, Flussmorphologischer Statusbericht, Karlsruhe, 31. Juli 1998
- /1/ RMD Rhein-Main-Donau, Donauausbau Straubing-Vilshofen, Längsschnitt Ist-Zustand, Plannummer C I SV 03 1 001.
- /2/ Anlage 5.2.A, Blatt 1 bis 3 des flussmorphologischen Statusberichtes zum Donauausbau Straubing - Vilshofen.
- /3/ Digitale Querprofile der Donau zwischen km 2319.0 und km 2244.0 alle 500 m aus dem Jahr 1995.
- /4/ Bayerisches Gewässerkundliches Jahrbuch, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft.
- /5/ Anlage 2.5.W des flussmorphologischen Statusberichtes zum Donauausbau Straubing - Vilshofen.
- /6/ Anlage 3.1 bis 3.4 der Kurzfassung des flussmorphologischen Statusberichtes zum Donauausbau Straubing - Vilshofen.