W I S S E N S C H A F T L I C H E R E I H E

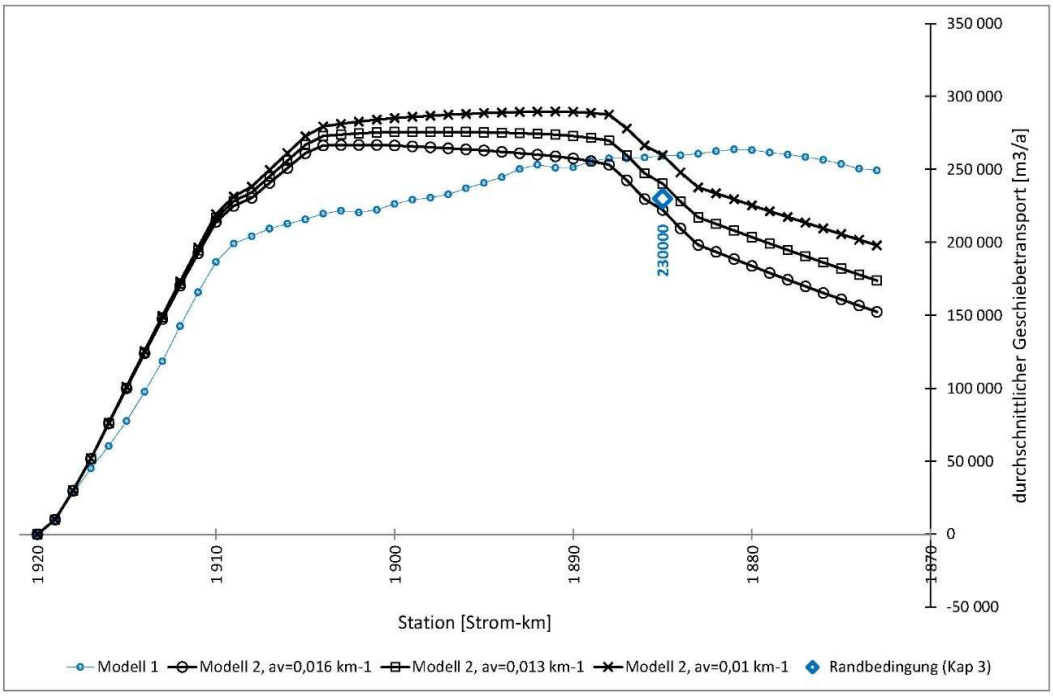
Heft 109/2026

Geschiebebewirtschaftung in der Donau östlich von Wien:

Geschieberückführungen aus dem unteren Teil der Strecke und zusammenhängende methodische Fragen

Diese Studie behandelt verschiedene konzeptive und methodische Fragen zur Analyse von Geschieberückführungen in der Donau östlich von Wien, und sie führt dafür relevante Daten und Informationen zusammen. Dabei werden Geschiebetransport, Sohlerosion, Abrieb und Kornverkleinerung analysiert sowie Grundlagen für ein neues Bemessungskonzept für Zugabematerial erarbeitet. Zudem wird ein Konzept für Monitoringmethoden auf Basis hydrographischer Daten zur frühzeitigen Erkennung von Sohlveränderungen entwickelt.

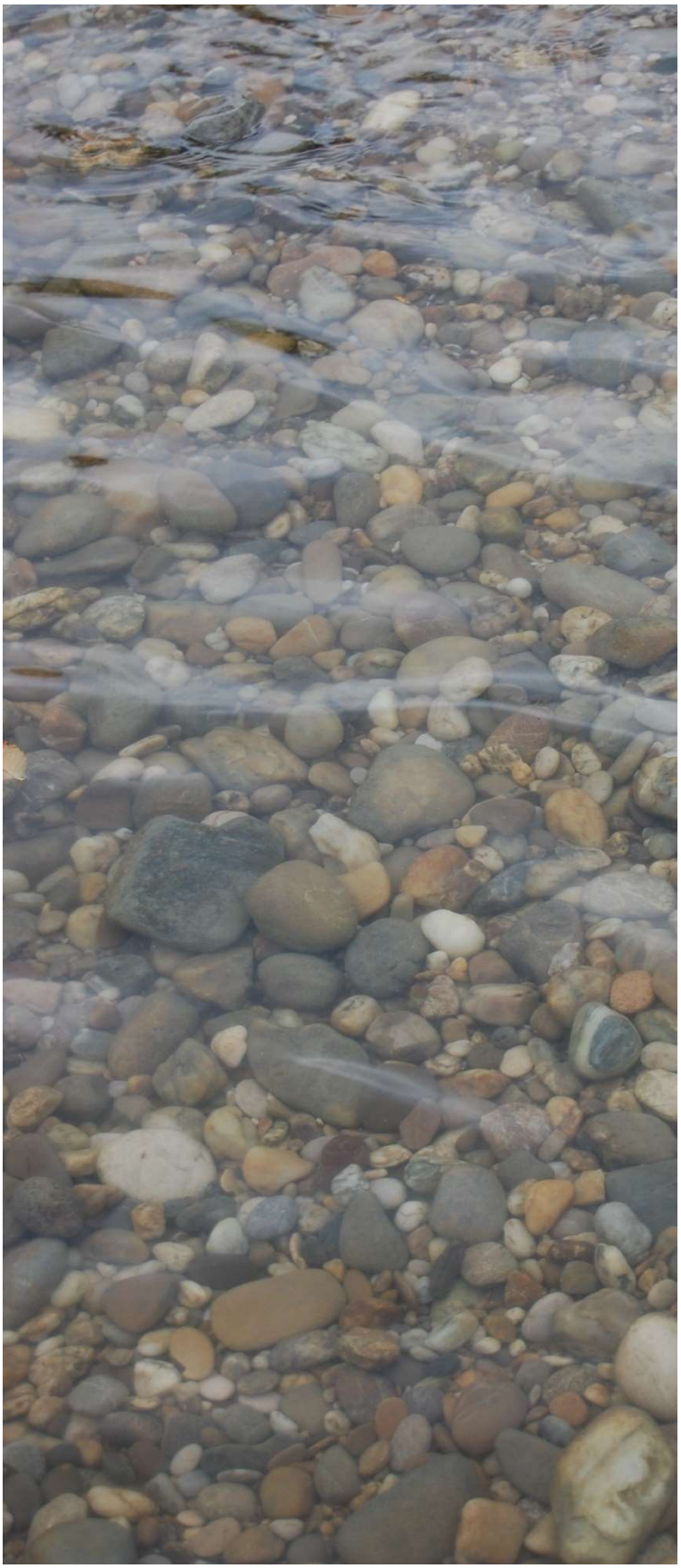
Dipl.-Ing. Gerhard Klasz



Nationalpark Donau Auen
FREIER FLUSS. WILDER WALD.

Ingenieurbüro
Dipl.-Ing. G. Klasz

Im Auftrag der
Nationalpark
Donau-Auen GmbH



STUDIE

Geschiebebewirtschaftung in der Donau östlich von Wien: Geschieberück-führungen aus dem unteren Teil der Strecke und zusammenhängende methodische Fragen

Wien, Mai 2026

IMPRESSUM:

Auftraggeber:

Nationalpark Donau-Auen GmbH
Schloss Orth
2304 Orth an der Donau

Auftragnehmer:

Ingenieurbüro (für Kulturtechnik & Wasserwirtschaft)
Dipl.-Ing. Gerhard Klasz
Franz-Josefs-Kai 27
1010 Wien

Bearbeitung:

Dipl.-Ing. Gerhard Klasz
gerhard.klasz@a1.net

Studie

Geschiebebewirtschaftung in der Donau östlich von Wien: Geschieberückführungen aus dem unteren Teil der Strecke und damit zusammenhängende methodische Fragen

Zusammenfassung:

Diese Studie behandelt verschiedene konzeptive oder methodische Fragen zur Analyse von Geschieberückführungen in der Donau östlich von Wien, und sie führt dafür relevante Daten und Informationen (auch aus der Fachliteratur) zusammen.

(1) Man kann in Verbindung mit den beobachtbaren Sohlerosionen (ab 1996) und anderen Informationen eine in Längsrichtung diskretisierte (differenzierte) Geschiebebilanz erstellen, wobei auch die Abriebverluste modelliert werden. Damit kann man untersuchen, wie sich der Geschiebetransport im Längsverlauf entwickelt und dies u.a. auch mit den vom Hydrographischen Dienst für Hainburg-Straßenbrücke angegebenen Geschiebefrachten vergleichen. Auf dieser Grundlage können auch örtlich differenzierte Geschiebezugaben und Geschieberückführungen berücksichtigt werden (Kapitel 2).

(2) Die Daten des Hydrographischen Dienstes zum Geschiebetransport am Pegel Hainburg-Straßenbrücke zeigen kleinere Geschiebefrachten als dies nach früheren Untersuchungen (im Besonderen BMNT, 2018) zu erwarten wäre (ca. 213.000 versus 260.000 m^3/a). Diese Diskrepanz wird kleiner, wenn man berücksichtigt, dass die Periode mit Daten (2008/2023) deutlich unterdurchschnittliche Abflüsse (und somit unterdurchschnittlichen Geschiebetransport) hatte. Die dann immer noch bestehende restliche Differenz (etwa 230.100 versus 260.000 m^3/a) lässt sich erklären (bzw. beseitigen), wenn man den Abriebbeiwert etwas höher als in BMNT (2018) ansetzt (Kapitel 3). Ein insgesamt konsistentes Bild ergibt sich mit $a_V \sim 0{,}014\ km^{-1}$ (Kapitel 2), was recht gut mit Erfahrungswerten aus der Fachliteratur zusammenpasst.

Sehr hilfreich ist auch die Rekonstruktion der vom Hydrographischen Dienst verwendeten Geschiebetransportfunktion, die von der Universität für Bodenkultur-IWA entwickelt wurde (Liedermann et al., 2017), und ihrer Anwendung auf beliebige Zeiträume, sofern dafür die dortigen Tagesabflüsse bekannt sind. Damit können auch die über den Hydrographischen Dienst nicht verfügbaren Werte der Jahre zwischen 1996 und 2007 ergänzt werden, was für die weiter oben beschriebene Aussage relevant ist, und was außerdem einen deutlich fallenden Trend bei den Geschiebefrachten über die Reihe 1996/2023 erkennen läßt (Kapitel 3).

(3) Es werden Daten zu charakteristischen Korndurchmessern des Bettmaterials (speziell D_{50}) in der Strecke zusammengeführt, daraus werden Kornverkleinerungs-Koeffizienten (downstream fining coefficients) nach dem Sternberg-Ansatz abgeleitet und mit Ergebnissen aus früheren Studien und sonstigen Informationen verglichen (Kapitel 4). Ein plausibler Wert von $c_D \sim 0{,}006\ km^{-1}$ (Bandbreite $c_D \sim 0{,}0407 \cdots 0{,}007\ km^{-1}$) zeigt in Verbindung mit dem (weiter oben angegebenen) a_V-Wert (also $a_D = a_V/3 \sim 0{,}0047\ km^{-1}$), dass in dieser Strecke Sortierung im Längenschnitt eine untergeordnete Rolle spielt, wie bereits früher (Klasz et al., 2017) argumentiert.

(4) Es wird eine physikalisch begründete und ingenieurmäßig einsetzbare Methode zur Erfassung der Wirkung von unterdurchschnittlich oder überdurchschnittlich großen Korngrößen in Bezug auf die Stabilität (bzw. Mobilität) des Zugabematerials entwickelt. Damit ergeben sich Abminderungsfaktoren für die Verwendung von weiter stromab gewonnenen Kiesen

(Geschieberückführung), weil deren Korngrößen im Längsverlauf (durch Sortierung und Abrieb) abgenommen haben. Und umgekehrt lassen sich für grobkörnigere Zugabematerialien Erhöhungsfaktoren ableiten. Dieser Ansatz baut auf unterschiedliche Aufenthaltszeiten in der Strecke auf, also auf unterschiedliche mittlere Partikelgeschwindigkeiten V_t, wobei Daten dazu aus Tracerversuchen in der Strecke (Liedermann et al., 2013) und vom Oberrhein (Gölz, 2002) verwendet werden, jeweils für verschiedene Korngrößen. Auf dimensionsanalytischer (also physikalisch begründbarer) Basis (Ferguson et al., 2002) wird gezeigt, wie man Daten aus unterschiedlichen Flüssen oder Flussabschnitten miteinander vergleichen kann (über dimensionslose Kennzahlen, im Besonderen über die Shields-Zahl und eine dimensionslose Partikelgeschwindigkeit). Damit wird letztlich ein neues Bemessungskonzept, das sich auf Feldversuche stützt, entwickelt (Kapitel 5); dieses könnte mit zukünftig gewonnenen Daten (speziell aus Tracerversuchen) noch weiter verbessert werden (adaptive Vorgangsweise).

(5) *Es wird ein Konzept zur Verwendung hydrographischer Daten (Pegelwasserstände und zugehörige Abflüsse) zur Verbesserung des Monitorings entwickelt (Kapitel 6) und für die Reihe 1996/2023 und einige Pegelstellen angewandt, wobei auf eine erst kürzlich abgeschlossene Studie (Klasz, 2025) zurückgegriffen wird. Dabei werden Zeitreihen charakteristischer Wasserstände für bestimmte, konstant behandelte Abflüsse (z.B. RNQ, MQ) mit möglichst hoher zeitlicher Auflösung (Jahreswerte) gebildet und untersucht, mit Trendanalysen (Mann-Kendall-Test) und Bruchpunkttests (Chow-Test). Für die Auswirkungen starker Geschieberückführungen sind die Pegel Bad Deutsch Altenburg, Hainburg, Thebnerstaßl und Wolfsthal zu berücksichtigen. Die Frage, die in Zukunft immer wieder zu überprüfen sein wird, ist, ob durch die Forcierung der Geschieberückführungen deutliche (und unerwünschte) Zunahmen der Eintiefungstrends im unteren Teilabschnitt bzw. das Umschlagen von Auflandungen zu Eintiefungen (in der Grenzstrecke) eingeleitet wird. Das methodische Werkzeug wird hier dargestellt.*

(6) *Ganz allgemein wird die Relevanz von Wasserständen und Wasserspiegeln für die Geschiebebewirtschaftung argumentiert und mit einem adaptiven Management-Ansatz verbunden. Mit der bisher angewandten Methodik, den regelmäßigen Stromsohlaufnahmen und den daraus gebildeten Materialbilanzen, werden Sohlerosionen (allgemeiner: Sohlhöhenänderungen) teilweise übersehen, nämlich in den flachen und ufernahen Bereichen, wo die Messboote unter niedrigen bzw. mittleren Wasserführungen keine Aufnahmen mehr liefern können. Mit den hydrographischen Daten und Auswertungen, was auch die KWD (Kennzeichnende Wasserstände der österreichischen Donau) und ähnliche Referenzwasserspiegel einschließt, kann diese Lücke geschlossen werden.*

(7) *In Verbindung mit den Überlegungen zum Monitoring und einem adaptiven Management-Ansatz (Linkov et al., 2006) sollten die Geschieberückführungen, deren Ausmaß in den letzten Jahren stark forciert wurden, so gesteuert werden können, dass der Nutzen dieser Maßnahme die Risiken und nachteiligen Auswirkungen deutlich übersteigt. Konzeption und Methoden dazu werden hier vorbereitet. Die detaillierte Bearbeitung dazu muss einer späteren Studie vorbehalten werden.*

Inhalt

1 Allgemeines und Zielsetzung 5

1.1 Vorgeschichte und Veranlassung 6

1.2 Untersuchungszeitraum und Untersuchungsbereich 7

1.3 Editorische Hinweise 7

2 Geschiebehaushalt im Längsverlauf 8

2.1 Bisheriger Kenntnisstand 8

2.2 Geschiebe-Bilanzgleichung und zugehörige Überlegungen 9

2.3 Zur Motivation und Fragestellung 11

2.4 Vorbemerkung zum Begriff des Abriebs bzw. der Abriebverluste 11

2.5 Im Längsverlauf differenzierte Modellierung, Methodik dazu 12

2.6 Ermittlung der Sohlspeicheränderungen im Längsverlauf (ab 1996) 14

2.7 Resultate für das im Längsverlauf differenzierte Geschiebe-Bilanzmodell 18

2.8 Weiterentwicklung des Geschiebe-Bilanzmodells, Sensitivitätsanalysen 19

3 Berücksichtigung und Analyse der Angaben des Hydrographischen Dienstes zum Geschiebetransport bei Hainburg 21

3.1 Motivation, Fragestellung und Relevanz 21

3.2 Langfristig gemittelte Geschiebefracht 21

3.3 Zur Geschiebetransportfunktion 23

3.4 Rekonstruktion der Geschiebefrachten früherer Jahre (ab 1996) 24

4 Kornverkleinerung im Längenschnitt, Abrieb und Sortierung 27

4.1 Allgemeine Hinweise, analytische Beschreibung 27

4.2 Daten gem. HZB (1937) für den Zustand vor Kraftwerkserrichtung 31

4.3 Daten gem. Ingenieurbüro Zottl & Erber (1987) 32

4.4 Daten gem. BOKU,-IWA & Ingenieurbüro Klasz (2022) 33

4.5 Zusammenführen der Ergebnisse zum c_D-Wert 35

5 Berücksichtigung von Geschiebezugaben mit abweichenden Korngrößen 37

5.1 Motivation und Fragestellung 37

5.2 Ein empirischer Ansatz für den Effizienzfaktor, Daten zur Donau (östlich von Wien) und zum Oberrhein 37

5.3 Unterschiedliche Arten von Geschwindigkeiten 40

5.4 Weitere Daten und Versuch einer dimensionsanalytischen Fundierung 41

5.5 Berücksichtigung weiterer Daten, dimensionslose Darstellung 44

5.6 Mittlere Partikelgeschwindigkeit und aktiver Layer 45
5.7 Mittlere Partikelgeschwindigkeit und Dünentransport 47
5.8 Anwendung der Beziehung für die virtuelle Geschwindigkeit auf die Effizienz 48
5.9 Zahlenbeispiele bzw. Sensitivitätsanalyse für die Donau östlich von Wien 48
5.10 Schwierigkeiten mit dem Ansatz 49

6 Zur Verbesserung des Monitorings 49

6.1 Allgemeine Anforderungen an die Daten und Informationen 49
6.2 Zum Konzept einer adaptiven Vorgangsweise 50
6.3 Das Problem der unzureichenden Stromsohlvermessungen 53
6.4 Relevanz, Vorteile und Nachteile der hydrographisch gestützten Methoden 54
6.5 Konkrete Fragestellungen im Zusammenhang mit den Geschieberückführungen 56
6.6 Spezielle Aspekte 61

1 Allgemeines und Zielsetzung

Auftraggeber dieser Studie ist die Nationalpark Donau-Auen GmbH; sie baut auf einigen früheren Untersuchungen auf, speziell auf einer Studie zur Geschiebebewirtschaftung (Klasz, 2014)[1], den Auswertungen und Diskussionen im Rahmen einer Arbeitsgruppe im zuständigen Ministerium (BMNT, 2018)[2] und einer erst kürzlich zum aktuellen Stand der Sohlerosion in der Strecke erstellten Studie (Klasz, 2025)[3].

Ziel ist einerseits die Entwicklung bzw. Weiterentwicklung bestimmter Modellvorstellungen, die im Zusammenhang mit Geschieberückführungen in der Donau östlich von Wien relevant sind, und andererseits die Zusammenführung bzw. die Weiterführung von Untersuchungen, die für diese Frage und ganz allgemein für die Geschiebebewirtschaftung in dieser Strecke hilfreich sein können.

Die wichtigsten Themen sind:

a.) die Aufbereitung eines 1d-numerischen Modells (rechentechnisch über Tabellenkalkulation) zum Geschiebehaushalt der Donau in Längsrichtung, vom Unterwasser des Kraftwerkes Freudenau bis etwa Wolfsthal, und das für die Phase ab 1996;

b.) die Analyse und Berücksichtigung der Angaben des Hydrographischen Dienstes (eHYD / Hydrographische Jahrbücher) zum Geschiebetransport bei Hainburg (Straßenbrücke) und Überlegungen und Auswertungen zu offensichtlichen Differenzen dieser Werte mit bisherigen Geschiebebilanzen (speziell in BMNT, 2018);

c.) die Berücksichtigung der Kornverkleinerung in Längsrichtung (Abnahme der mittleren Korndurchmesser) für die Geschieberückführungen (Abminderungsbeiwert für feinkörnigeres Kiesmaterial); und allgemeiner: die Entwicklung eines neuen Bemessungskonzeptes für Zugabematerial unterschiedlicher Korngrößen, was auch die Verwendung gröberer Fraktionen (Sohlvergröberung) einschließt;

d.) Überlegungen zur Verbesserung des Monitorings (konzeptive Bearbeitung); dies unter besonderer Berücksichtigung des unteren Teilabschnitts (etwa Bad Deutsch Altenburg bis Wolfsthal);

e.) die Zusammenführung der relevanten Kriterien und Überlegungen, speziell in Hinblick auf Steuer- und Zielkriterien für die Geschieberückführungen (konzeptive Bearbeitung); Einbettung dieser Überlegungen in ein adaptives Management (iSv. Linkov et al., 2006)[4]

Es sollen also Grundlagen und Konzepte für diese Geschieberückführungen aktualisiert bzw. in einzelnen Fragen neu geschaffen werden. Allerdings ist aufgrund des engen finanziellen Rahmens nicht die

---

1 Klasz, G. (2014): Zu den Möglichkeiten einer Geschiebebewirtschaftung und den zugehörigen Optimierungspotentialen für die Donau östlich von Wien. Studie im Auftrag der Nationalpark Donau-Auen GmbH. Wissenschaftliche Reihe des Nationalparks Donau-Auen, Heft 37 /2015.

2 Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, 2018: Endbericht der Arbeitsgruppe Sohlentwicklung in der freien Fließstrecke unterstrom Kraftwerk Freudenau.

3 Klasz, G. (2025): Untersuchung zur Sohlerosion der Donau östlich von Wien über den Zeitraum 1996/2023 und damit zusammenhängende Änderungen der mittleren Grundwasserstände an donaunahen Messstellen. Aktualisierung der Studie vom September 2024. Wissenschaftliche Reihe des Nationalparks Donau-Auen, Heft 81 /2026.

4 Linkov, I., Satterstrom, F. K., Kiker, G., Batchelor, C., Bridges, T., & Ferguson, E. 2006. From comparative risk assessment to multi-criteria decision analysis and adaptive management: Recent developments and applications. Environment International, 32(8), 1072-1093.

Entwicklung eines detaillierten numerischen Modells möglich, und auch nicht die Ausarbeitung von Details. Die Bearbeitung muss sich auf konzeptive Aspekte konzentrieren und auf einfachen (und dennoch tragfähigen) Modellvorstellungen aufbauen.

Neben den Zugabemengen haben dabei auch andere Fragen (Korngrößenverteilungen; Abriebverluste; Monitoring) größere Bedeutung. Die übergeordnete Fragestellung ist aber, wieviel Geschiebe überhaupt für Rückführungen zur Verfügung steht, wie das optimal genutzt werden kann und wie man es zweckmäßig steuert.

In all diesen Aspekten hat diese Studie einen Initialcharakter. Die meinsten Fragen werden nicht abschließend behandelt; das ist in diesem Themenfeld, wo vieles nach dem Prinzip „Versuch und Irrtum" läuft, ohnehin selten möglich; hier werden in erster Linie bestimmte Ideen und Konzepte soweit entwickelt, dass man später darauf aufbauen und damit weiterarbeiten kann.

1.1 Vorgeschichte und Veranlassung

Seit einigen Jahrzehnten wird an vielen Flüssen Sedimentmanagement (Geschiebe und Schwebstoff) betrieben. Am Oberrhein, stromab der Staustufe Iffezheim, wird seit 1978 permanent und in größeren Mengen Geschiebe (Kies) zugegeben, mit dem Ziel, dort weitere Sohlerosionen zu verhindern (Felkel, 1970, 1987; Kuhl, 1993)[5].

Auch in der österreichischen Donau östlich von Wien wird dieses Konzept seit Inbetriebnahme des Kraftwerkes Freudenau (Teilstau 1996, Vollstau 1998) verfolgt. Dies allerdings aus verschiedenen (und dem Grunde nach juristischen) Gründen nur unvollständig, d.h. die Zugaben reichten und reichen (Stand: August 2026) nicht aus, das Geschiebedefizit vollständig zu decken (BMNT, 2018; Klasz, 2025). Basis dieser Maßnahmen bildet ein vom Kraftwerksbetreiber wasserrechtlich eingereichtes und (mit diversen ergänzenden Auflagen) wasserrechtlich genehmigtes Konzept zur Unterwasser-Sicherung beim Kraftwerk Freudenau.

Im Rahmen einer über das zuständige Ministerium eingesetzten Arbeitsgruppe wurde der Erfolg dieser Maßnahmen schließlich evaluiert (BMNT, 2018), auf dieser Grundlage und über einen §21a-WRG-Bescheid wurden die Zugabemengen von (durchschnittlich) rd. 188.000 m^3/a auf 235.000 m^3/a erhöht, mit zusätzlichen Auflagen (speziell zur Kornverteilung des verwendeten Materials). Zwischen 2023 und 2025 wurden die nun ergänzten Maßnahmen erneut evaluiert, wobei zumindest über eine vom Nationalpark beauftragte und in diesen Prozess eingebrachte Studie (Klasz, 2025) erneut die Notwendigkeit einer weiteren Erhöhung der VHP-Geschiebezugaben (auf zumindest 270.000 m^3/a) festgestellt und argumentiert wurde.

Parallel dazu hat in den letzten Jahren die viadonau ihre Maßnahmen zum „Wasserstraßen- und Geschiebemanagement" weiterentwickelt. In den letzten Jahren wurden vor allem die Geschieberückführungen intensiviert (Geschiebefänge bei Furt Treuschütt und Hainburg), wodurch einerseits das Geschiebedefizit im oberen Teil der Strecke reduziert wurde, und andererseits mit größter

[5] Felkel, K. (1970): Ideenstudie über die Möglichkeit der Verhütung von Sohlenerosion durch Geschiebezufuhr aus der Talaue ins Flussbett, dargestellt am Beispiel des Oberrhein. Mitteilungsblatt der BAW, 1970, H. 30, S. 21 – 29.
Felkel, K. (1987): Acht Jahre Geschiebezugabe am Oberrhein; Wasserwirtschaft, 77. Jahrgang, Heft 4 – 1987.
Kuhl, D. (1993): Die Geschiebezugabe unterhalb der Staustufe Iffezheim von 1978 bis 1992: Mitteilungsblatt der BAW, 1993, Nr. 70.

Wahrscheinlichkeit Sohlerosionen im Bereich bei Bad Deutsch Altenburg und Hainburg wieder verstärkt wurden. Relevant ist diesbezüglich auch eine zuletzt begründete Kooperation zwischen viadonau und VERBUND, wodurch eben auch der VHP Kies aus den Geschiebefängen zur Verfügung gestellt wird. Insgesamt nimmt die Bedeutung von Geschieberückführungen deutlich zu.

Insgesamt haben die bisher durchgeführten Maßnahmen die schlimmsten Auswirkungen des Geschieberückhaltes durch die flussauf gelegenen Staustufen verhindert; ohne sie wären Eintiefungsraten in der Größenordnung von etwa 5 cm/a zu erwarten (vgl. u.a. Gruber, 1969; Ingenieurbüro Zottl & Erber, 1987; Klasz, 2025)[6]. Doch es ist eben noch keine vollständige Geschiebebewirtschaftung. Über verschiedene Vorarbeiten (Klasz, 2014) und Veröffentlichungen (Klasz et al., 2013; 2017)[7] und ergänzende Literaturrecherchen ist klar, dass in diesem Themenfeld die Notwendigkeit von Verbesserungen bestehen und verschiedene konzeptive Überlegungen zweckmäßig sind. Das Absinken der niederen und mittleren Donau- und Grundwasserspiegel (als Folge der Sohlerosion) führt zu erheblichen negativen ökologischen und wasserwirtschaftlichen Wirkungen.

In einer Besprechung (18.03.2025) mit Vertretern des Nationalparks, der viadonau und der Verbund Hydro Power wurden dazu vom Ingenieurbüro Klasz verschiedene Ideen und Themen präsentiert. Auf dieser Grundlage erfolgte schließlich seitens der Nationalpark Donau-Auen GmbH die Beauftragung für diese Studie.

1.2 Untersuchungszeitraum und Untersuchungsbereich

Untersuchungsstrecke ist die freie Fließstrecke der Donau zwischen dem Unterwasser der Staustufe Freudenau (Strom-km 1921) und der Pegelstelle Wolfsthal (Strom-km 1874,84).

Dort, wo hydrographische Daten verwendet werden, erstrecken sich die Untersuchungen auf den Zeitraum zwischen 1996 (Teilstau am Kraftwerk Freudenau im März 1996; Gründung des Nationalparks im Oktober 1996) und 2023 (Daten-Verfügbarkeit). Konzeptive Überlegungen beziehen sich ebenfalls auf diesen Zeitraum. Für die Auswertungen zur Kornverkleinerung im Längenschnitt werden teilweise auch ältere Daten verwendet.

1.3 Editorische Hinweise

Diese Studie wurde ohne Assistenz durch „künstliche Intelligenz“ (hoffentlich aber mit ausreichend natürlicher Intelligenz) erstellt.

---

[6] Gruber, O. (1969): Gewässerkunde und Hydrographie im Bundesstrombauamt; Österreichische Wasserwirtschaft, Jahrgang 21 – Heft 1/2 – 1969.
Zottl & Erber Ingenieurbüro (1987): Donau im Raum Wien - Bad Deutsch-Altenburg, Untersuchung der Sohlstabilität im Zusammenhang mit der Staustufe Wien; Studie im Auftrag der Stadt Wien – MA 45 (Wasserbau).

[7] Klasz G., Reckendorfer W., Baumgartner C., Gabriel H., Gutknecht D. (2013): River-bed degradation and overbank deposition: A human induced geomorphic disequilibrium in the Donau-Auen National Park. 5th Symposium for Research in Protected Areas (10 to 12 June, Mittersill); Conference Volume, 379-384.
Klasz, G., Küblbäck, G., Gmeiner, P., Liedermann, M., Habersack, H., & Gutknecht, D. (2017). Kornverkleinerung durch Abrieb und Sortierung im Kontext eines Geschiebemanagements in der Donau östlich von Wien. Österreichische Wasser-und Abfallwirtschaft, 70, 220-229.

Einige Auswertungen werden in den Anhängen detaillierter dargestellt; zusätzlich werden wichtige Ergebnisse aus Literaturrecherchen zusammengefasst: Anhänge A1 bis A4.

2 Geschiebehaushalt im Längsverlauf

In diesem Kapitel wird die Geschiebebilanz für die Donau östlich von Wien (Kraftwerk Freudenau Unterwasser bis etwa Pegel Wolfsthal) in eine im Längsverlauf differenzierte (diskretisierte) Form gebracht, man kann damit abschätzen, wie sich einzelne Teile des Geschiebehaushaltes (im Besonderen die Geschiebefrachten) im Längenschnitt verändern.

2.1 Bisheriger Kenntnisstand

Der Geschiebehaushalt der freien Fließstrecke der Donau (zwischen den Staustufen Freudenau und Gabcikovo) war Thema verschiedener Untersuchungen. Die erste dazu bekannte Studie für die österreichische Donau war Gruber (1969), damals noch für die Phase des beginnenden Kraftwerksausbaues[8]. Zwischenzeitlich haben sich die Verhältnisse mit dem weiteren Ausbau wesentlich verändert und in Bezug auf die Stabilität der Sohllage weiter verschärft.

Günstig (für die Verläßlichkeit solcher Abschätzungen) ist der Umstand, dass die obere Randbedingung (d.h. der Geschiebeeintrag von der Oberliegerstrecke) mit $V_{GE} \sim 0$ bekannt ist.

Mit dem Kenntnisstand von 2016 waren folgende Richtwerte für den Geschiebehaushalt der Gesamtstrecke östlich von Wien bekannt (alle Werte hier aus Klasz et al., 2016)[9]:

- Geschiebeeintrag aus der Oberliegerstrecke (Stauraum Wien): vernachlässigbar;
- Geschiebezugaben (VHP) ca. 194.000 m³/a;
- Sohlspeicher-Änderungen (Sohlerosion) ca. 151.000 m³/a;
- Entnahmen durch Baggerungen (seit 1996) annähernd vernachlässigbar;
- Abrieb-Volumenverluste ca. 45.000 bis 90.000 m³/a;
- Geschiebeaustrag in die Unterliegerstrecke (Stauraum Gabcikobo, slowakischer Donauabschnitt): ca. 255.000 bis 295.000 m³/a.

All diese Angaben sind als langjährig gemittelte Werte zu verstehen.

---

[8] Das stromauf nächste Donau-Kraftwerk war damals Ybbs-Persenbeug (Strom-km 2060,4) und hatte nach Gruber (1969) gravierende Folgen auf den Geschiebehaushalt der Unterliegerstrecke, und zwar auch noch in Bad Deutsch Altenburg, wo bei Fangkorb-Messungen eine Vergröberung des aufgefangenen Geschiebes in der Zeit zwischen 1956/1957 und 1962/1965 (von ca. $D_m = 12{,}9$ mm auf $D_m = 26{,}0$ mm festgestellt wurde (Gruber, 1969). Leider liegen diese Messwerte aber nicht mehr im Detail vor, und in dem genannten Aufsatz werden diese Fragen eher nebenbei behandelt, es geht dort primär um eine Darstellung der Leistungen des damaligen Bundesstrombauamtes auf dem Gebiet der Hydrographie (also auch Beobachtung von Wasserständen, Abflüssen, Schwebstoffen, Wassertemperaturen usw.).

[9] Klasz, G., Gabriel, H., Habersack, H., Schmalfuß, R., Baumgartner, C. und Gutknecht, D. (2016): Ausmaß und Dynamik der Sohlerosion der Donau östlich von Wien – flussmorphologische und wasserwirtschaftliche Aspekte. Österreichische Wasser- u. Abfallwirtschaft, 68 (5-6), 199-207.

In einer Arbeitsgruppe des für Wasserwirtschaft und Wasserrecht zuständigen Bundesministeriums BMNT[10] wurden mit Stand 2017/18 und den damals aktuellen Stromgrundaufnahmen (der viadonau) und sonstigen Informationen folgende Werte für den Zeitraum von 1996 bis 2017 ermittelt:

- Geschiebezugaben (VHP): ca. 188.000 m³/a;
- Sohlspeicher-Änderungen (Sohlerosion): ca. 150.000 m³/a für die Gesamtstrecke (Strom-km 1921 bis 1880); davon entfallen ca. 45.000 m³/a auf die VHP-Erhaltungsstrecke (Strom-km 1921 bis 1910) und ca. 105.000 m³/a auf die restliche Strecke (Strom-km 1910 bis 1880);
- gesamtes Geschiebedefizit über die gesamte Strecke (bis etwa Marchmündung), wenn kein Geschiebe zugegeben wird bzw. würde, also (Summe aus Zugaben und dennoch eingetretenen Sohlerosionen): ca. 340.000 m³/a;
- Abrieb-Volumenverluste: ca. 85.000 m³/a (über die gesamte Strecke);
- Geschiebeaustrag an der Staatsgrenze: ca. 260.000 m³/a;

(BMNT, 2018).

2.2 Geschiebe-Bilanzgleichung und zugehörige Überlegungen

In mathematischer Form lässt sich für eine beliebig gewählte Teilstrecke (vgl. Abbildung 1) folgende Bilanzgleichung formulieren:

$$V_{GE} + V_Z - V_E - V_{GA} - V_A - \Delta V_S = 0 \qquad (2.1)$$

mit: V_{GE} Geschiebeeintrag (aus der Oberliegerstrecke), V_Z Geschiebezugaben (wasserbaulich), V_E Geschiebeentnahmen (wasserbaulich, d.h. Baggerungen), V_{GA} Geschiebeaustrag (in die Unterliegerstrecke), ΔV_S Sohlspeicheränderung (in Form von Sohlerosionen und/oder Auflandungen)[11] und V_A Abriebs-Volumenverlust.

Gl. (2.1) ist eine zeitlich und örtlich diskretisierte Form der Exner-Differentialgleichung (Kontinuitätsbedingung für Geschiebe), wobei zusätzlich Abrieb und wasserbauliche Maßnahmen berücksichtigt werden.

Wäre Seitenerosion möglich, was in der Donau östlich von Wien vernachlässigbar ist, dann müsste dafür ein zusätzlicher Anteil (den man mit V_{SE} bezeichnen könnte) eingeführt werden.

Hier und im Folgenden wird über Volumina bilanziert; präziser formuliert sind es Volumina und Volumenänderungen über bestimmte Zeiträume (meist im Jahresdurchschnitt), also $[m^3 a^{-1}]$. Die physikalisch korrekte Form wäre eine Bilanzierung über Massen bzw. Massenänderungen pro Zeiteinheit, also $[kg.a^{-1}]$. Es wird im Folgenden vorausgesetzt, dass für das Geschiebe immer eine bestimmte und

---

10 Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (alias: BMLFRW: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft; heute: BMLUK: Bundesministerium Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft. Es gab in der Vergangenheit auch auch noch andere Bezeichnungen bzw. Umbenennungen.

11 Zum Vorzeichen: Wenn Sohlerosion (d.h. Abnahme des Sohlspeichers) negativ und Auflandungen (Zunahme des Sohlspeichers) positiv notiert werden, dann ist die Sohlspeicheränderung in der Gleichung mit Minuszeichen einzuführen, wie angegeben.

praktisch konstante Lagerungsdichte ρ_L (für die im Folgenden 1700 kg/m³ gesetzt wird)[12] gegeben ist und daher volumenbezogene Werte verwendet werden können.

Diese Bilanzgleichung für das Geschiebe, die bei konstanter Lagerungsdichte der Massenerhaltung entspricht, muss grundsätzlich, für jede beliebige Zeitspanne und für jeden beliebig definierten Abschnitt und im Übrigen „exakt" erfüllt sein. Über die Abriebs-Beziehung wird die Umwandlung eines Teiles des Geschiebes in Schwebstoff (eventuell auch zu den gelösten Stoffen) berücksichtigt. Größere Unschärfen kommen in der praktischen Bearbeitung über die Abriebverluste in diese Grundbeziehung.

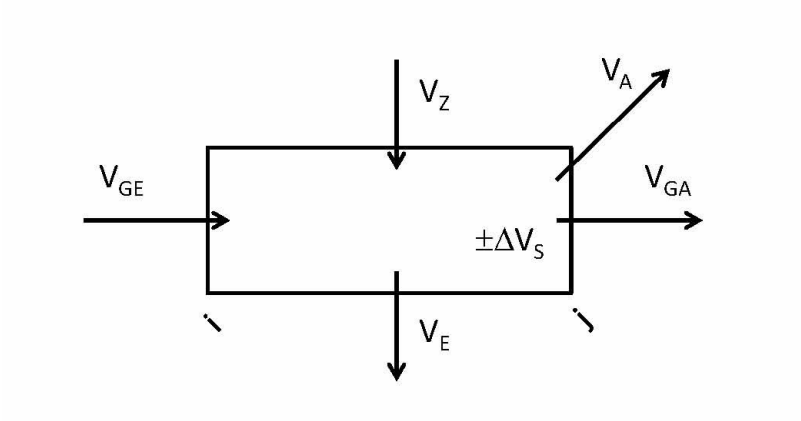


Abbildung 1: Prinzipbild zur Geschiebebilanz für einen beliebigen Streckenabschnitt

Die Grenzen i und j (Stationen im Längsverlauf) können beliebig gewählt werden, es müssen nur die zugehörigen Randbedingungen eingesetzt werden.

Zur Zuverlässigkeit der Kenntnisse zu den einzelnen Komponenten ist Folgendes anzumerken:

- Der Geschiebeeintrag (aus dem Stauraum Wien) ist nach derzeitigem Kenntnisstand vernachlässigbar gering[13] (Klasz et al., 2016; BMNT, 2018); die damit verbundenen Unschärfen können als gering eingeschätzt werden;
- die Zugabemengen (durch VHP, ggf. auch durch via donau) sind bekannt; das Gleiche gilt für Entnahmemengen (durch viadonau), die für den Zeitraum ab 1996 praktisch vernachlässigbar waren; die damit verbundenen Unschärfen werden als gering eingeschätzt;
- die Sohlspeicheränderungen sind aus der Auswertung von Stromgrundaufnahmen (Differenzvolumina) grundsätzlich ableitbar; mit diesem Anteil werden beobachtbare Werte berücksichtigt; Unsicherheiten entstehen allerdings einerseits daraus, dass bei einzelnen Stromgrundaufnahmen ufernahe, seichte Zonen (Randbereiche) nicht dokumentiert sind (zu geringe Aufnahmebreiten), und andererseits durch methodisch bedingte Fehler und Genauigkeitsgrenzen;
- der Geschiebeaustrag (in die Unterliegerstrecke) war bisher nur ungenau bekannt und kann nun, durch die im Folgenden erläuterten Berechnungen besser abgeschätzt werden, vgl. auch Kap. 2.8; damit sind allerdings immer noch größere Unschärfen verbunden;

---

[12] Für einzelne Sensitivitätsuntersuchungen wird auch $\rho_L = 1800$ kg/m³ gesetzt. Dieser Wertebereich für die Lagerungsdichte (von 1700 bis 1800 kg/m³) entspricht einer Porosität von ca. $\varphi = 0{,}36 \cdots 0{,}32$ und kann durch Fachliteratur (z.B. Meyer-Peter & Lichtenhahn, 1963) begründet werden.

[13] Geringe Mengen (bezogen auf längere Durchrechnungszeiträume) können allerdings eingetragen werden, wenn der Stau gelegt wird, also während Extremhochwässern. Dazu liegen keine Daten vor.

- Der Abriebverlust war bisher nur ungenau bekannt und kann nun, in Verbindung mit den in Kap. 2.8 erläuterten Berechnungen, besser abgeschätzt werden;

Diese Überlegung berücksichtigt noch nicht die Geschieberückführungen der viadonau, entspricht also dem Zustand bis etwa 2009; ab etwa 2015 gab es dann stärkere Geschieberückführungen (vgl. Klasz et al., 2017).

2.3 Zur Motivation und Fragestellung

Das oben (unter Kap. 2.2) dargestellte Modell behandelt die gesamte Untersuchungsstrecke als eine Einheit, erlaubt also keine Differenzierungen innerhalb der Strecke. Eine solche Differenzierung wäre aber gerade für diese Strecke aus verschiedenen Gründen zweckmäßig:

- Geschiebezugaben konzentrieren sich auf den oberen Teil der Strecke (VHP-Erhaltungsstrecke);
- Sohlerosionen und damit Sohlspeicheränderungen fallen im Längsverlauf ungleichmäßig (ungleichförmig) aus: theoretisch keine Sohlerosion in der oberen VHP-Erhaltungsstrecke[14], starke Sohlerosionen stromab der VHP-Erhaltungsstrecke, die in Fließrichtung dann abnehmen, annähernd Beharrung bei Hainburg, und Umschlagen in eine Auflandungstendenz noch weiter stromab (Staueinfluss durch Kraftwerk Gabcikovo);
- Maßnahmen mit Geschiebeumlagerungen innerhalb der Strecke, also etwa auch Geschieberückführungen, können in einem solchen Modell nicht adäquat abgebildet werden, das ist der tiefere Grund dafür, dass eine spezielle Formel zum Geschiebezugabe-Äquivalent entwickelt werden musste, vgl. Klasz et al. (2017);
- und schließlich sind auch Informationen zur Entwicklung des Geschiebetransportes und des Abriebes innerhalb der Strecke zweckmäßig, vor allem dann, wenn an einer bestimmten Stelle (z.B. Hainburger Straßenbrücke) Messungen vorliegen und diese mit den Ergebnissen aus dem Modell verglichen werden können.

2.4 Vorbemerkung zum Begriff des Abriebs bzw. der Abriebverluste

Die Kornverkleinerung in Fließrichtung (downstream fining) wird im Allgemeinen sowohl durch Abrieb als auch durch Sortierung bestimmt, vgl. Kap. 4. Für die Geschiebebilanz und die hier behandelten Fragen ist aber nur der Abrieb relevant. Denn nur der Abrieb führt dazu, dass Geschiebe reduziert wird, also „verlorengeht“ (in Schwebstoff umgewandelt wird, event. auch in gelöste Stoffe) und damit morphologisch und für die Stabilität der Sohllage nicht mehr zur Verfügung steht. Der von der Sortierung betroffene Anteil geht hingegen nicht verloren, sondern wird bloß langsamer oder überhaupt nicht mehr bewegt, bleibt aber im Sohlspeicher ΔV_s enthalten.

[14] „Theoretisch keine Sohlerosion“: Im Sinn der wasserrechtlichen Vorgaben (Auflagen) zum Kraftwerk Freudenau. Tatsächlich kam es auch in dieser VHP-Erhaltungsstrecke wegen Imperfektionen bei der Erfolgskontrolle (zu geringe Aufnahmebreiten für die Stromgrundaufnahmen) zu einem Geschiebedefizit, vgl. auch und Klasz et al. (2016). Im Rahmen der Arbeitsgruppe im BMNT und auf Grundlage von Auswertungen der viadonau wurde dieses Defizit mit ca. 45.000 m^3/a (im langjährigen Mittel) abgeschätzt (BMNT, 2018).

2.5 Im Längsverlauf differenzierte Modellierung, Methodik dazu

Im Folgenden wird die Untersuchungsstrecke in n Einzelstrecken (mit n Einzel-Geschiebebilanzen) unterteilt (Diskretisierung), sh. Abbildung 2. Die Länge der Teilstrecken Δx_i kann beliebig gewählt werden, jeweils gleich lang (äquidistante Diskretisierung) oder auch ungleich, ganz nach Belieben. Im Folgenden werden jeweils 1 km lange Teilelemente vorausgesetzt, ohne Einschränkung der Allgemeinheit.

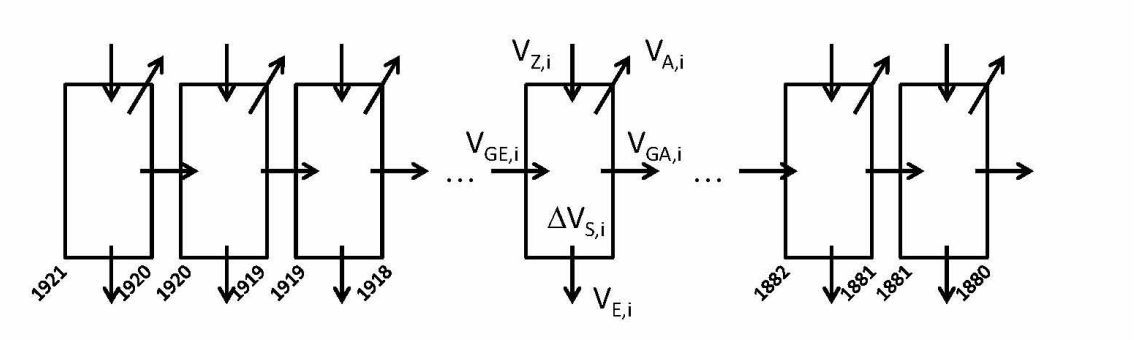


Abbildung 2: Grundkonzept (Prinzipbild) zu einem im Längsverlauf differenzierten Geschiebebilanzmodell

Nun kann für jedes Teilelement eine Geschiebebilanz (analog zu Gl. (2.1)) formuliert werden:

$$V_{GE,i} + V_{Z,i} - V_{E,i} - V_{GA,i} - V_{A,i} - \Delta V_{S,i} = 0 \tag{2.2}$$

wobei für den Geschiebeeintrag $V_{GE,i}$ der Geschiebeaustrag des unmittelbar stromauf benachbarten Teilelements $V_{GA,i-1}$ zu setzen ist (Kontinuitätsbedingung für das Geschiebe):

$$V_{GE,i} = V_{GA,i-1} \tag{2.3}$$

Über diese Beziehung (Gl. 2.3) handelt es sich um ein System gekoppelter Gleichungen (mit $n-1$ Nebenbedingungen), das von oben nach unten gelöst werden muss.

Der Geschiebeabrieb (Volumenverlust) innerhalb des Teilelements $V_{A,i}$ kann durch Anwendung des Sternberg-Ansatzes auf die Geschiebefracht GF_i innerhalb des Elements (und Zeitschritts) und analog (Gl. 4.1):

$$V_{A,i} = GF_i \cdot (1 - e^{-a_V \cdot \Delta x}) \tag{2.4}$$

berechnet werden, mit der Länge des Teilelements Δx und dem (im Folgenden für alle Teilelemente gleich angenommenen Volumen-Abriebbeiwert a_V [km^{-1}]. Im Gegensatz zu den Überlegungen und Auswertungen in Kap. 4 wird hier nur die Wirkung des Abriebes berücksichtigt, während Sortierprozesse keinen direkten Einfluss auf die Geschiebebilanz haben, es muss daher $a_V \leq c_V$ gelten (Gleichheit dann, wenn es keine Sortierung im Längsverlauf gibt).

Für die Geschiebefracht GF_i (innerhalb des Teilelements) wäre grundsätzlich der Mittelwert aus Geschiebeeintrag und Geschiebeaustrag des jeweiligen Elements zu setzen, also:

$$GF_i = \frac{1}{2} \cdot \left(V_{GE,i} + V_{GA,i}\right) \tag{2.5}$$

Allerdings ist $V_{GA,i}$ zunächst ja unbekannt (die Komponente ergibt sich erst als Ergebnis aus der Bilanzgleichung mit Kenntnis des Abriebverlustes), vereinfachend wird im Folgenden:

$$GF_i = V_{GE,i} + \frac{1}{2} \cdot \left(V_{Z,i} - V_{E,i} - \Delta V_{S,i}\right) \tag{2.6}$$

gesetzt, was für kurze Teilelementstrecken einen sehr geringen und praktisch vernachlässigbaren Fehler mit sich bringt (GF_i und damit $V_{A,i}$ werden geringfügig überschätzt). Im Rahmen einer allfälligen Weiterentwicklung des Modells könnte dieser Ansatz über eine iterative Vorgangsweise (mit beliebiger Genauigkeit) verbessert werden.

Die Komponenten $V_{Z,i}$ (Geschiebezugabe im Element), $V_{E,i}$ (Geschiebeentnahme im Element) und $\Delta V_{S,i}$ (Änderung des Sohlspeichers des Elements) sind hier exogene Größen, sie sind durch wasserbauliche Maßnahmen gegeben oder durch hydrographische Beobachtungen der Stromsohle (Stromsohlaufnahmen und Ermittlung der Differenzvolumen) bekannt.

Wenn das Vorzeichen der Speicheränderungen positiv für Auflandungen und negativ für Sohlerosion gewählt wird (Konvention)[15], dann muss das Vorzeichen vor $\Delta V_{S,i}$ in den (Gl. 2.2) und (Gl. 2.6) negativ gesetzt werden (Sohlerosion erhöht die Geschiebefracht), wie in diesen Gleichungen bereits formuliert.

Im Gegensatz zum Ansatz nach Pkt. 2.2 können jetzt die Eingangswerte in Längsrichtung differenziert (diskretisiert) werden, es ergeben sich im Längsverlauf variable Geschiebefrachten und Abriebverluste.

Außerdem können nun auch Geschieberückführungen direkt modelliert werden (allerdings noch ohne Berücksichtigung der höheren Mobilität durch reduzierte Korndurchmesser, vgl. Kap. 5), indem die zugehörige Menge über $V_{E,i}$ an der Entnahmestelle i und in gleicher Größe über ein $V_{Z,j}$ an der Verklappstelle j berücksichtigt wird.

Dieses Modell könnte zukünftig noch weiterentwickelt werden, u.a.:

- Korngrößenverteilungen könnten in das Modell eingebaut werden, indem jedes Teilelement in mehrere Korngrößen-Fraktionen unterteilt wird (z.B.: Feinkies 2/6,3 mm; Mittelkies 6,3/20 mm; Grobkies 20/63 mm; Steine 63/254 mm)[16] und diese Fraktionen entsprechend der einzelnen Fraktionsgewichte $\Delta p_i^{D_j/D_{j+1}}$ (aus Sieblinien) gewichtet werden; alle Komponenten würden dann in Teilkomponenten (nach Fraktionen) unterteilt werden können, was in Vektorschreibweise (Gl. (2.7)) (dort für ein Drei-Komponentenmodell) formuliert werden kann. Ein erheblicher Vorteil dieser Erweiterung wäre, dass man damit die Veränderung der Korngrößenverteilungen durch Abrieb (also im Längsverlauf), ggf. durch die Summenwirkung aus Abrieb und Sortierung, modellieren könnte; hier liegt aber auch ein praktisches Problem: es ist zu vermuten, dass der Verkleinerungsfaktor c_V (bzw. auch der reine Abriebfaktor) nicht unabhängig vom Korndurchmesser ist, sondern vielmehr stark davon abhängig (starke Kornverkleinerung mit höheren Koeffizienten für größere Partikel, und mit kleineren Koeffizienten für kleine Partikel), und darüber ist derzeit wenig bekannt.

[15] Bezogen auf den Sohlspeicher aber plausibel, er nimmt durch Sohlerosion ab und durch Auflandung zu.

[16] Oder beliebige andere Korngrößen-Fraktionen.

$$\begin{pmatrix} V_{GE_i}^{D_1/D_2} \\ V_{GE_i}^{D_2/D_3} \\ V_{GE_i}^{D_3/D_4} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{Z_i}^{D_1/D_2} \\ V_{Z_i}^{D_2/D_3} \\ V_{Z_i}^{D_3/D_4} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} V_{E_i}^{D_1/D_2} \\ V_{E_i}^{D_2/D_3} \\ V_{E_i}^{D_3/D_4} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} V_{GA_i}^{D_1/D_2} \\ V_{GA_i}^{D_2/D_3} \\ V_{GA_i}^{D_3/D_4} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} V_{A_i}^{D_1/D_2} \\ V_{A_i}^{D_2/D_3} \\ V_{A_i}^{D_3/D_4} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \Delta V_i^{D_1/D_2} \\ \Delta V_i^{D_2/D_3} \\ \Delta V_i^{D_3/D_4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

- Die Sohlspeicheränderung, die bisher als aus Beobachtungen bekannt und somit als exogene Größe behandelt wurde, könnte endogenisiert werden, d.h. das Modell wäre so zu erweitern, dass es die Sohlspeicheränderungen aus anderen im Modell enthaltenen Größen berechnet; dazu ist aber derzeit kein praktikabler Ansatz verfügbar (es wären dafür wohl zusätzliche Modellparameter zur Transportwirksamkeit erforderlich)[17].

  Ein Zwischenschritt wäre aber mit einem einfacheren Konzeptansatz denkbar, wenn ein Geschiebetransportvermögen (über eine oder zwei Kalibrierparameter) eingeführt und die Sohlspeicheränderung als Funktion der Differenz zwischen diesem Transportvermögen und dem jeweiligen Geschiebetransportvermögen angesetzt wird, im Sinn eines Sättigungsansatzes.

2.6 Ermittlung der Sohlspeicheränderungen im Längsverlauf (ab 1996)

Abbildung 3 zeigt den über die Untersuchungsperiode 1996/2015 kumulierten Geschiebeaustrag für die Donau zwischen dem Unterwasser des Kraftwerkes Freudenau (Strom-km 1921) und Wolfsthal, wie das aus den Stromsohlaufnahmen für 1996 (Herbstaufnahme, Wasserstraßendirektion) und 2015 (Herbstaufnahme, viadonau) zurückgerechnet werden kann, vgl. Klasz et al. (2016)[18].

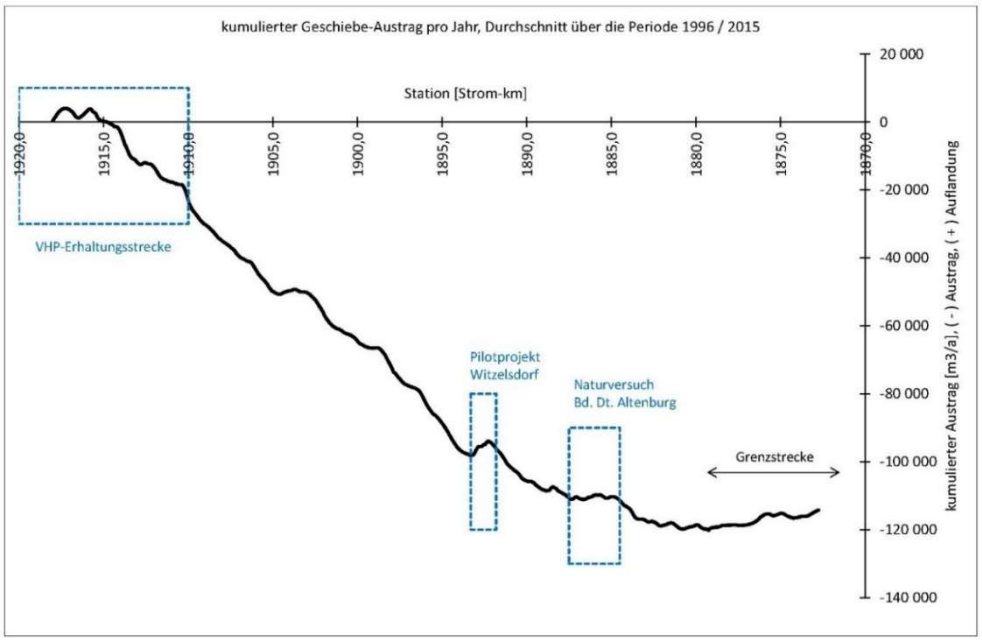


Abbildung 3: Kumulierter Geschiebeaustrag für die Donau zwischen Wien (Kraftwerk Freudenau Unterwasser) und Wolfsthal und den Zeitraum 1996 bis 2015; Basisdaten: Stromgrundaufnahmen der Wasserstraßendirektion bzw. der via donau; Auswertung / Quelle: Klasz et al. (2016)

17 Also z.B. Sohlschubspannungen oder Unit Stream Power, solche Parameter sind aber primär vom Durchfluss abhängig und nicht sinnvoll über zeitgemittelte Werte darstellbar.

18 Diese Auswertung hatte damals Dipl.-Ing. H. Gabriel als Mitautor durchgeführt und zur Veröffentlichung beigetragen. Mittlerweile werden solche Auswertungen standardmäßig durch viadonau vorgenommen.

Die damit verbundene Sohlspeicheränderungen pro Jahr und Strom-km [$\mathrm{m^3 km^{-1} a^{-1}}$] werden in Abbildung 4 geplottet.

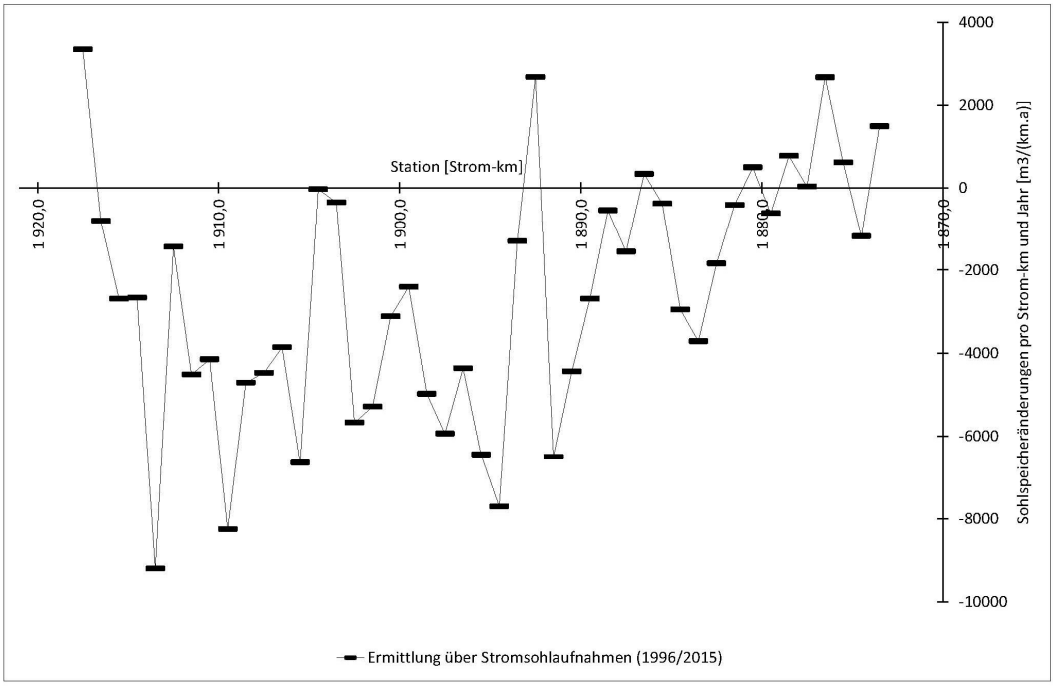


Abbildung 4: Sohlspeicheränderungen für die Donau zwischen Wien (Kraftwerk Freudenau Unterwasser) und Wolfsthal und den Zeitraum 1996 bis 2015; Basisdaten: Stromgrundaufnahmen der Wasserstraßendirektion bzw. der via donau; Auswertung / Quelle: Klasz et al. (2016)

Man erkennt verschiedene lokale Besonderheiten, etwa eine Spitze am oberen Rand (offensichtlich lokale Effekte durch die dort starken VHP-Zugaben), und eine weitere Spitze (lokales Maximum) bei Strom-km 1892, offensichtlich durch starke Auflandungen zufolge des Pilotprojektes Witzelsdorf (Strom-km 1893,3 bis 1891,8; Bauphase: 2007/2009, vgl. Klasz et al., 2009a)[19]. Generell zeigt sich das Bild einer Rotationserosion, also mit starken Erosionen im oberen Bereich (auch in der unteren Hälfte der VHP-Erhaltungsstrecke), abnehmenden Erosionen stromab gerichtet und dem Umschlagen in ein Auflandungsregime bei Strom-km 1880 (Marchmündung) oder knapp stromauf davon[20], vgl. auch Klasz et al. (2016) und Klasz (2025).

Gemäß dieser Auswertung, also für den Zeitraum 1996/2015, lag das Defizit in der VHP-Erhaltungsstrecke bei ca. 22.000 $m^3 a^{-1}$ und flussab der VHP-Erhaltungsstrecke bis zur hydromorphologischen Stauwurzel (bei etwa Strom-km 1881) bei rd. 98.000 $m^3 a^{-1}$.

Im Rahmen der ganz ähnlichen Auswertungen in BMNT (2018) wurden für den Untersuchungszeitraum 1996/2016 höhere Werte gefunden, und zwar ca. 45.000 m³/a für die VHP-Erhaltungsstrecke und ca. 105.000 m³/a in der restlichen Strecke.

---

19 Klasz, G.; Krouzecky, N.; Reckendorfer, W.; Schmalfuß, R. und Schlögl, R. (2009a): Neue wasserbauliche Wege: Uferrückbau und Buhnenumgestaltung an der Donau östlich von Wien. Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift (ÖIAZ), 154. Jg., Heft 1-6/2009.

20 Dieser Umschlagpunkt wird im Folgenden auch als „hydromorphologische Stauwurzel“ bezeichnet; er muss nicht grundsätzlich ortsfest sein, sondern könnte sich stromauf oder stromab verschieben.

Bei diesen Auswertungen ist auch zu berücksichtigen, dass das Defizit im unteren Teilabschnitt durch die temporären Geschiebezugaben von rd. 120.000 m³ beim Naturversuch Bad Deutsch Altenburg (2013/2014) etwas gedämpft wurden; im zeitlichen Durchschnitt (über die Untersuchungsperiode) ergibt das dort eine Zugabemenge bei ca. 6000 $\mathrm{m^3 a^{-1}}$.

Außerdem gibt es Überlegungen, dass der Wert von 45.000 m³/a für das Defizit in der VHP-Erhaltungsstrecke eher als Untergrenze zu verstehen ist und der Wert wahrscheinlich noch etwas höher lag, mutmaßlich bei rd. 60.000 m³/a (Klasz, 2025).

Eine weitere Möglichkeit der Abschätzung des Defizits des Sohlspeichers besteht über den zeitlichen Vergleich kennzeichnender Wasserspiegellagen (im Längsverlauf). Abbildung 5 zeigt die Änderungsraten zwischen dem MW-1996 (gem. KWD-1996; Wasserstaßendirektion, 1998) und dem MW-2020 (viadonau, 2023), Q-kompensiert (Klasz, 2025), wobei zusätzlich auch ein Glättungsalgorithmus eingesetzt wurde, sh. weiter unten.

Die Absenkungen der MW-Differenzen in der Grenzstrecke sind auf dort fehlerhafte Werte in den KWD-2020 zurückzuführen. Die Werte für RNW (gemäß KWD-2020) zeigen dort keine solchen Absenkungen (hier nicht geplottet), vor allem aber hat der Pegel Wolfsthal (Strom-km 1874,84) über die gesamte Phase (1996/2023) eine durchgängige Auflandungstendenz von etwa 0,8 cm/a (Klasz, 2025) bzw. Abbildung 27. Daher wird für die Grenzstrecke (Strom-km 1880 bis 1873) eine Korrektur vorgenommen (rote Linie in Abbildung 5), was sich aber auf die Auswertungen für die stromauf gelegene Erosionsstrecke ohnehin nicht auswirkt.

Arbeitet man mit den KWD-Änderungen für einzelne Stromkilometer bzw. Pegelstellen, dann erhält man einen ziemlich unruhigen Verlauf, mit verschiedenen lokalen Spitzen, was sowohl mit lokalen Effekten als auch mit lokalen Fehlern begründet werden kann. Für die Fragestellung in dieser Studie sind örtliche Besonderheiten irrelevant; es geht um die generellen Zusammenhänge, die mit der Rotationserosion sichtbar werden. Es erfolgt daher zusätzlich eine Glättung (Smoothing) über ein zentriert gleitendes Mittel mit n=5 (2 und 1 km stromauf, direkt an der jeweiligen Stelle, 1 und 2 km stromab), wobei eine lineare Gewichtung (0,333; 0,667; 1; 0,667, 0,333) angewendet wird. Multipliziert man schließlich diese Änderungsraten mit einer mittleren MW-Breite (hydraulisch wirksame Wasserspiegelbreite, d.h. unter Abzug strömungsberuhigter Zonen, etwa im Lee von Leitwerken und Buhnenfelder), dann muss die dabei erhaltene Volumen-Änderungsrate (unter Annahme zeitlich gleich gebliebener Rauheiten und Gefällewerte) im Wesentlichen der gesuchten Sohlspeicher-Änderungsrate entsprechen, wobei lokale Auflandungen oder Eintiefungen geglättet („verschmiert“) werden. Für die mittlere MW-Breite wird im Folgenden $B_{MW} = 250$ m gesetzt, auf der „sicheren Seite“ liegend (in BMNT, 2018 und Klasz, 2025 wurde mit $B_{MW} =$270 m gerechnet). Damit erhält man schließlich die in Abbildung 6 angegebenen Werte für die Sohlspeicheränderungen pro Jahr und Strom-km [$m^3 km^{-1} a^{-1}$], die dann unter Pkt. 2.8 verwendet werden.

Mit diesem Ansatz erhält man Sohlspeicheränderungen für die VHP-Erhaltungsstrecke von ca. 50.000 m³/a und für die Gesamtstrecke (bis zur hydromorphologischen Stauwurzel) von rd. 147.000 m³/a, was den Werten gem. BMNT (2018) sehr nahe kommt.

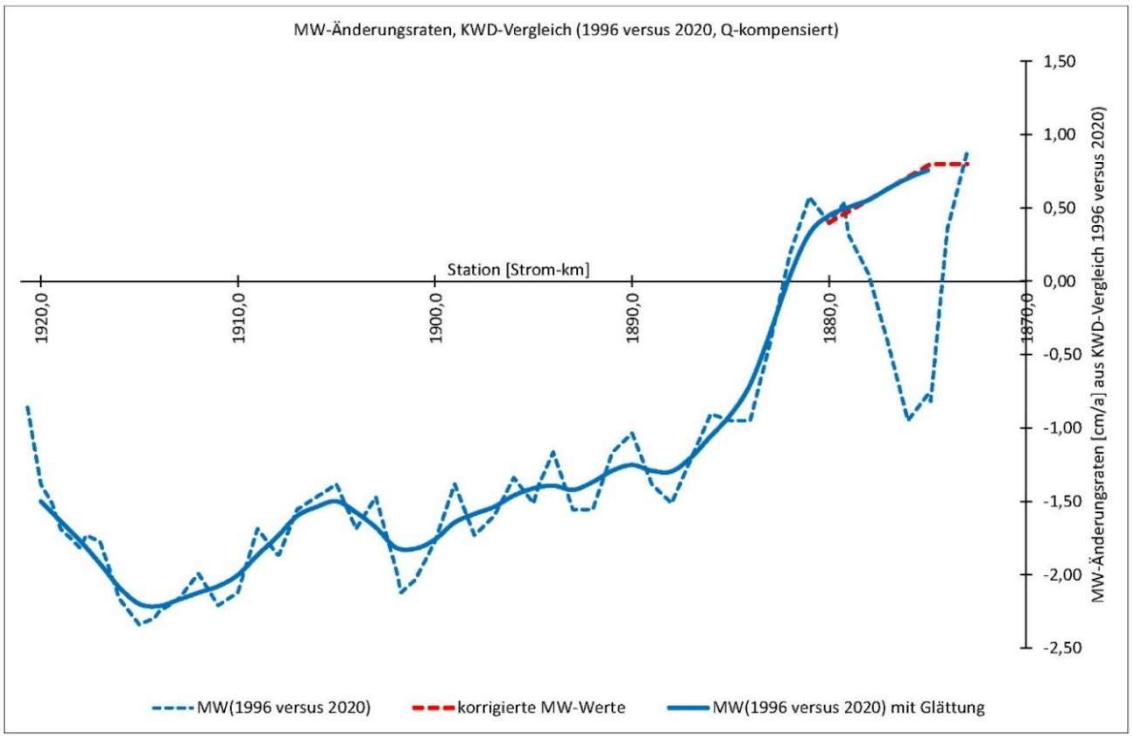


Abbildung 5: MW-Änderungsraten aus dem Vergleich zwischen MW-1996 (KWD-1996) und MW-2020 (KWD-2020), Q-kompensiert; der Verlauf wurden zusätzlich geglättet (n=5 zentriert gleitendes Mittel mit linearer Gewichtung), vgl. auch die Anmerkungen im Text.

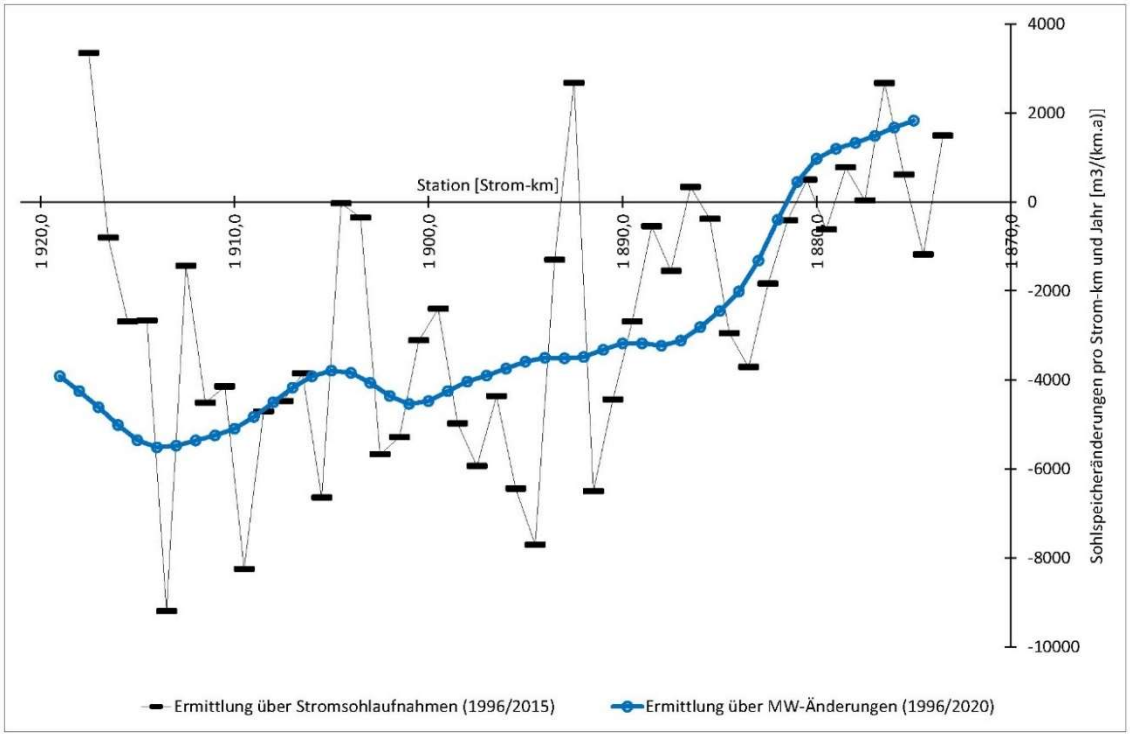


Abbildung 6: Sohlspeicheränderungen für die Donau zwischen Wien und Wolfsthal und den Zeitraum ab 1996, Ermittlung aus Wasserspiegeländerungen (MW, KWD-1996 versus KWD-2020), zum Vergleich werden auch die Werte nach Abbildung 4 (Ermittlung aus Stromgrundaufnahmen) geplottet

2.7 Resultate für das im Längsverlauf differenzierte Geschiebe-Bilanzmodell

Mit den in Kap. 2.6 beschriebenen Auswertungen zu den Sohlspeicher-Änderungen, die sich auf den Zeitraum 1996 bis 2015 beziehen (Abbildung 3) und mit folgenden Rechenannahmen:

- VHP-Geschiebezugaben (im Mittel 188.000 m^3/a) gleichmäßig über die Teilelemente Strom-km 1920 bis 1910 verteilt;
- viadonau-Geschiebezugaben durch den Naturversuch Bad Dt. Altenburg (gesamt ca. 120.000 m^3; im zeitlichen Mittel: ca. 6000 m^3/a, gleichmäßig auf die drei Teilelemente Strom-km 1887 bis 1884 verteilt);
- Vernachlässigung aller weiteren Geschiebeentnahmen und Zugaben, also auch der bisherigen Geschieberückführungen (ab 2009);
- für alle Teilelemente gleicher Abriebbeiwert a_V;

ergeben sich schließlich die in Abbildung 7 angegebenen Geschiebefrachten im Längsverlauf.

Der Abriebbeiwert a_V wurde hier so kalibriert, dass sich für Strom-km 1880 (Marchmündung) annähernd der in BMNT (2018) abgeschätzte Wert von rd. 260.000 m^3/a ergibt. Dies ist in diesem Modell mit einem Abriebkoeffizient von $a_V = 0{,}006$ km^{-1} der Fall.

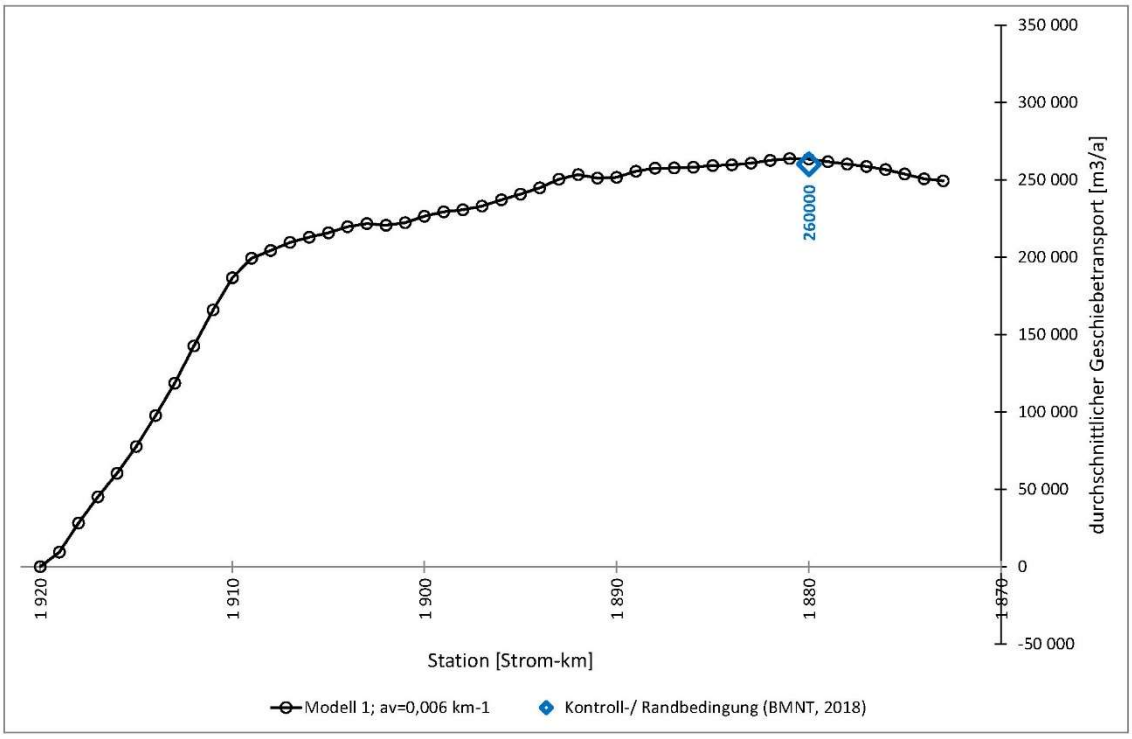


Abbildung 7: Geschiebefrachten im Längsverlauf als Ergebnis des längsdifferenzierten Geschiebebilanzmodells (mittlere Jahreswerte für die Beobachtungs- bzw. Untersuchungsperiode 1996 bis 2016)

Man erhält damit einen einigermaßen realistischen Verlauf der Geschiebefrachten im Längsverlauf, und zwar unter Berücksichtigung der beobachteten Stromsohländerungen und der rechnerischen Abriebverluste. Interessant ist ein erster (und stark ausgeprägter) Knick am unteren Rand der VHP-Erhaltungsstrecke (Strom-km 1910), ein zweiter (weniger stark ausgeprägter) Knick bei etwa Wildungsmauer (Strom-km 1894) und der recht gleichmäßige Verlauf stromab davon.

Gäbe es hingegen keinen Abrieb, also $a_V = 0$ km^{-1}, dann würden mit diesen Modellannahmen die Geschiebefrachten bis zur Marchmündung (Strom-km 1880) auf etwa 310.000 m^3/a ansteigen; der Einfluss des Abriebes ist also über diese Strecke stark und nicht vernachlässigbar.

2.8 Weiterentwicklung des Geschiebe-Bilanzmodells, Sensitivitätsanalysen

Im Folgenden wird das in Kap. 2.7 erläuterte eindimensionale Geschiebebilanzmodell weiter modifiziert, und zwar mit vier wesentlichen Änderungen:

- die VHP-Geschiebezugaben werden unter Berücksichtigung der ab 2018 erhöhten Mengen (auf 235.000 m^3/a) höher angesetzt, und zwar auf rd. 200.000 m^3/a, was dem Mittel der Reihe 1996/2023 entspricht;
- für die Sohlerosion (Speicheränderungen $\Delta V_{S,i}$) im Längsverlauf werden nun nicht mehr die aus dem Zeitraum 1996/2015 abgeleiteten Werte (Abbildung 4) verwendet, sondern unter Berücksichtigung der zusätzlichen Auswertungen (Kap. 2.6) und der Ergebnisse von BMNT (2018) die Werte gem. Abbildung 6 angesetzt, also mit einem idealisierten Verlauf ohne örtliche Spitzen;
- der Abriebkoeffizient a_V $[km^{-1}]$ wird nun nicht so festgelegt, dass sich damit ein bestimmter (und plausibler) Geschiebeaustrag am unteren Ende ergibt, also im Sinn einer Kalibrierung, sondern wird über einen plausiblen Bereich variiert (vgl. auch Kap. 4), mit $a_V = 0{,}010 \cdots 0{,}013 \cdots 0{,}016$ km^{-1} (Sensitivitätsanalyse);
- die Geschieberückführungen (der viadonau) werden berücksichtigt, allerdings nicht mit den besonders hohen Werten (ab 2015), sondern im Sinn eines Mittels über die gesamte Periode 1996/2023 (unter Berücksichtigung der Daten in Klasz et al., 2017 und viadonau, 2026), wobei auch zusätzliche Rechenannahmen zu den Transportweiten getroffen werden (Tab. 1);

Die anderen, unter Pkt. 2.7 genannten Rechenannahmen (viadonau-Zugaben über den Naturversuch bei Bad Deutsch Altenburg; gleichmäßige Aufteilung der VHP-Zugaben über sie Strecke Strom-km 1920 bis 1910; konstanter Abriebkoeffizient über die gesamte Strecke) bleiben unverändert.

Tabelle 1: Rechenannahmen zu den Geschieberückführungen der viadonau, im Mittel über die Untersuchungsperiode (1996/2023)

	Geschiebezugaben (Zugabebereich)	Geschiebeentnahmen (Baggerbereich und Geschiebefänge)
Mengen:	40.000 m^3/a	40.000 m^3/a
Ort:	Strom-km 1909 bis 1905 Verklappbereiche, flussab der VHP-Erhaltungsstrecke	Strom-km 1888 bis 1884 primär Geschiebefänge Treuschütt und Hainburg, und dortige Instandhaltungsbaggerungen

Mit diesen Annahmen (Tab. 1) sind durchschnittliche Geschieberückführungen von ca. 840.000 $m^3 k m a^{-1}$ (Transportleistung) verbunden. In den letzten Jahren, vor allem ab 2017, wurden deutlich höhere Leistungen erzielt, etwa im Bereich zwischen 2,5 und 3,0 Mio. $m^3 k m a^{-1}$ (vgl. Anhang A), aber hier ist der Durchschnitt der Periode 1996/2023 relevant, denn auf diese Zeit werden auch die anderen Eingangsgrößen (VHP-Zugabemengen und Sohlspeicheränderungen) bezogen.

Damit erhält man schließlich die in Abbildung 8 angegebenen Verläufe für die Geschiebefrachten im Längsverlauf.

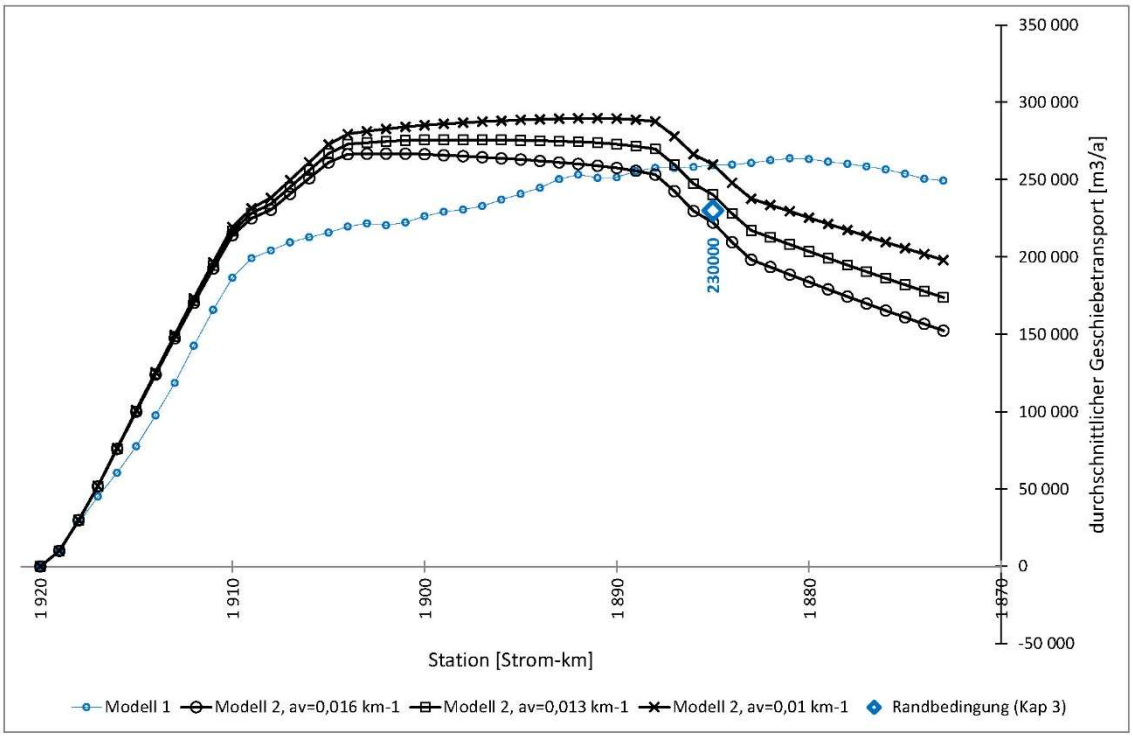


Abbildung 8: Geschiebefrachten im Längsverlauf als Ergebnis des längsdifferenzierten Geschiebebilanzmodells, verbessertes Modell (mittlere Jahreswerte für die Beobachtungs- bzw. Untersuchungsperiode 1996 bis 2023) und Sensitivitätsanalyse für verschiedene Abriebkoeffizienten

Im Vergleich zum ersten Modell (nach Kap. 2.7), in Abbildung 8 als blaue Linie eingetragen, steigt der Geschiebetransport in der VHP-Erhaltungsstrecke stärker an, es gibt auch einen weiteren Anstieg bis Strom-km 1906 (wegen der dortigen viadonau-Zugaben), während für den unteren Teilabschnitt, flussab von Strom-km 1889, aufgrund der dortigen Baggerungen (bzw. Entnahmen über Geschiebefänge) stärkere Abnahmen zu erkennen sind. Auch in der Grenzstrecke fallen die Werte stärker als beim ersten Modell, wegen der höheren a_V-Werte.

Im mittleren Teilabschnitt, zwischen Strom-km 1905 und 1890, verlaufen die Kurven annähernd horizontal, dort werden die Zunahmen der Geschiebefrachten durch Sohlerosion weitgehend durch die Abriebverluste kompensiert.

Mit einem Volumen-Abriebkoeffizient von geschätzt ca. $a_V \sim 0{,}014\ km^{-1}$ wird die Kontrollbedingung (von rd. 230.000 m³/a) bei der Straßenbrücke Hainburg (Kap. 3) annähernd erreicht. Der Geschiebeaustrag (bei der Marchmündung) ist mit diesen Modellannahmen deutlich geringer als in BMNT (2018) abgeschätzt.

Instationäre Effekte (innerhalb der jeweiligen Untersuchungsperiode) werden mit diesem Modell (bzw. Methode) nicht berücksichtigt. Die Nachrechnung weiterer Szenarien (im Sinn von Sensitivitätsanalysen) wäre möglich, soll aber späteren Studien vorbehalten bleiben.

3 Berücksichtigung und Analyse der Angaben des Hydrographischen Dienstes zum Geschiebetransport bei Hainburg

3.1 Motivation, Fragestellung und Relevanz

Über eHYD werden für die Pegelstelle Hainburger Straßenbrücke (Strom-km 1886,24) und ab 2008 Tageswerte zum Geschiebetransport veröffentlicht; über die digitalen Hydrographischen Jahrbücher (ebenfalls über eHYD) sind noch zusätzliche Informationen (speziell zu den Korngrößen) verfügbar.

Diese Transportraten werden nicht direkt gemessen, sondern aus einer Durchfluss-Geschiebetransport-Beziehung abgeleitet, die auf Basis der Geschiebemessungen der BOKU ermittelt wurde (sh. weiter unten). Man kann aus den Daten langjährig gemittelte Geschiebefrachten für diesen Bereich und Zeitraum (2008/2023) ableiten und dies mit den unter Kap. 2 durchgeführten Szenario- bzw. Sensitivitätsanalysen vergleichen. Aus diesem Vergleich kann man schließlich den für die Strecke wirksamen Abriebkoeffizient zurückrechnen (bzw. abschätzen), und man erhält eine kohärente Geschiebebilanz für die freie Fließstrecke östlich von Wien.

Außerdem erhält man damit Informationen über die Abhängigkeit des Geschiebetransportes von den Abflüssen und der zeitlichen Variabilität der Geschiebefrachten. Auf dieser Grundlage sollte man dann auch quantitativ beurteilen können, wie sich unterschiedliche Zeiträume, also trockenere oder abflussstärkere, in ihren Geschiebefrachten unterscheiden.

3.2 Langfristig gemittelte Geschiebefracht

Die Geschiebe-Jahresfrachten $GF(i)$ [t/a] aus den eHYD-Daten werden in Abbildung 9 als Zeitreihe dargestellt und in Tab. 2 gemeinsam mit den mittleren Abflüssen MQ_i der einzelnen Jahre aufgelistet.

Im Mittel über die Reihe 2008/2023 lag die Jahresfracht bei ca. 11,47 kg/s bzw. 361.800 t/a. Unter Annahme einer mittleren Lagerungsdichte von 1700 kg/m³ entspricht das einem (volumenbezogenen) Geschiebetransport vom rd. 213.000 m³/a. Mit einer mittleren Lagerungsdichte von 1800 kg/m³ wären es rd. 201.000 m³/a. Diese Werte liegen deutlich unter der dort nach BMNT (2018) zu erwartenden Jahresfracht von rd. 260.000 m³/a und auch unter anderen früheren Ergebnissen (z.B. Klasz et al., 2016).

Die Standardabweichung der Jahreswerte (2008/2023) liegt bei 2,755 kg/s; damit und mit den anderen Parametern ($\bar{x} = 11{,}47; n = 16$) kann ein 95%-Vertrauensbereich von

$$\left[\bar{x} - t_{\left(1-\frac{\alpha}{2};n-1\right)}\frac{s}{\sqrt{n}}; \bar{x} + t_{\left(1-\frac{\alpha}{2};n-1\right)}\frac{s}{\sqrt{n}}\right] = [10{,}00;\ 12{,}93]\ kg/s$$

angegeben werden, d.h. 315.500 bis 408.200 t/a.

Bei der Interpretation dieser Resultate und dem Vergleich mit früheren Abschätzungen ist zu berücksichtigen, dass die Abflüsse der Reihe 2008/2023 unterdurchschnittlich waren, es war eine trockene und daher auch unterdurchschnittlich transportwirksame Phase (Klasz, 2025), vgl. auch Tab. 2.

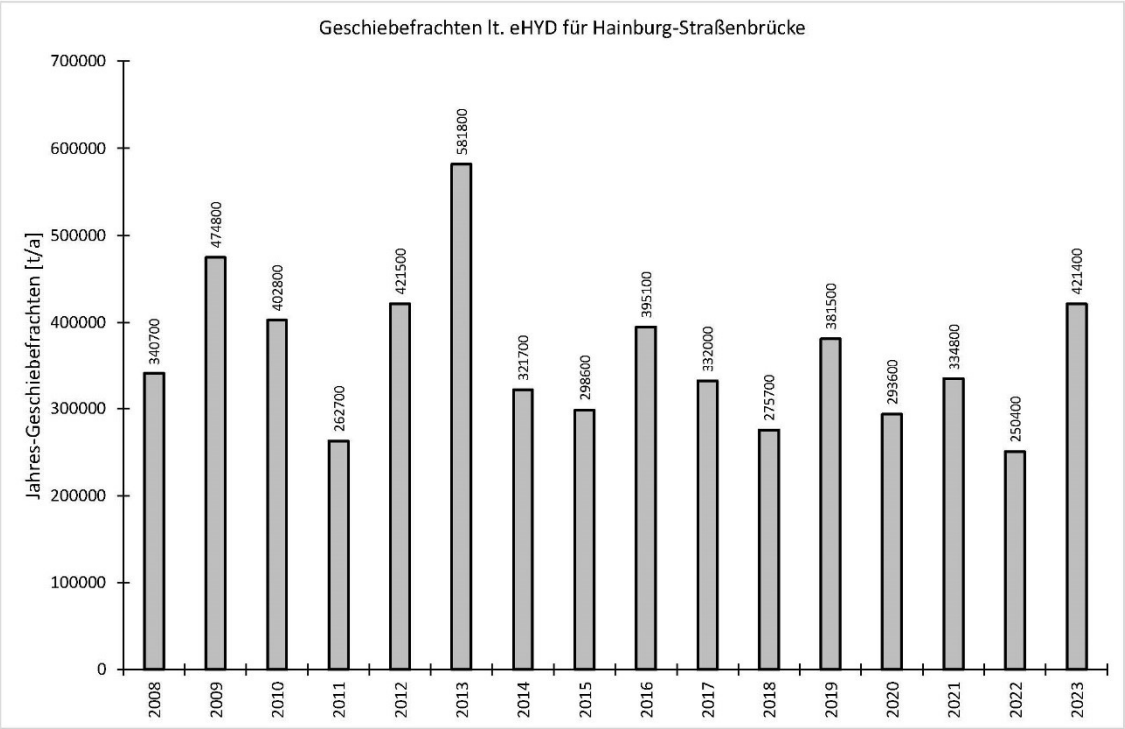


Abbildung 9: Zeitreihe der über die eHYD-Daten ermittelten Jahres-Geschiebefrachten (Reihe 2008/2023) an der Messstelle Hainburg-Straßenbrücke

Tabelle 2: Mittlere Geschiebe-Transportraten bzw. Jahresfrachten (Messstelle: Hainburg Straßenbrücke) und zugehörige Jahres-MQ (Pegel Hainburg), Reihe: 2008/2023

Jahr	GT [kg/s]	GT [t/a]	MQ(i) [m3/s]
2008	10,80	340700	1772
2009	15,05	474800	2053
2010	12,76	402800	1903
2011	8,33	262700	1546
2012	13,36	421500	1987
2013	18,44	581800	2231
2014	10,20	321700	1698
2015	9,46	298600	1625
2016	12,52	395100	1874
2017	10,52	332000	1768
2018	8,74	275700	1571
2019	12,09	381500	1875
2020	9,30	293600	1674
2021	10,61	334800	1720
2022	7,94	250400	1538
2023	13,35	421400	1907
Mittel	**11,47**	**361819**	**1796**

Es besteht im Übrigen ein sehr enger Zusammenhang zwischen den mittleren Jahresabflüssen und den Jahres-Geschiebefrachten; dies wird in Abbildung 10 dargestellt.

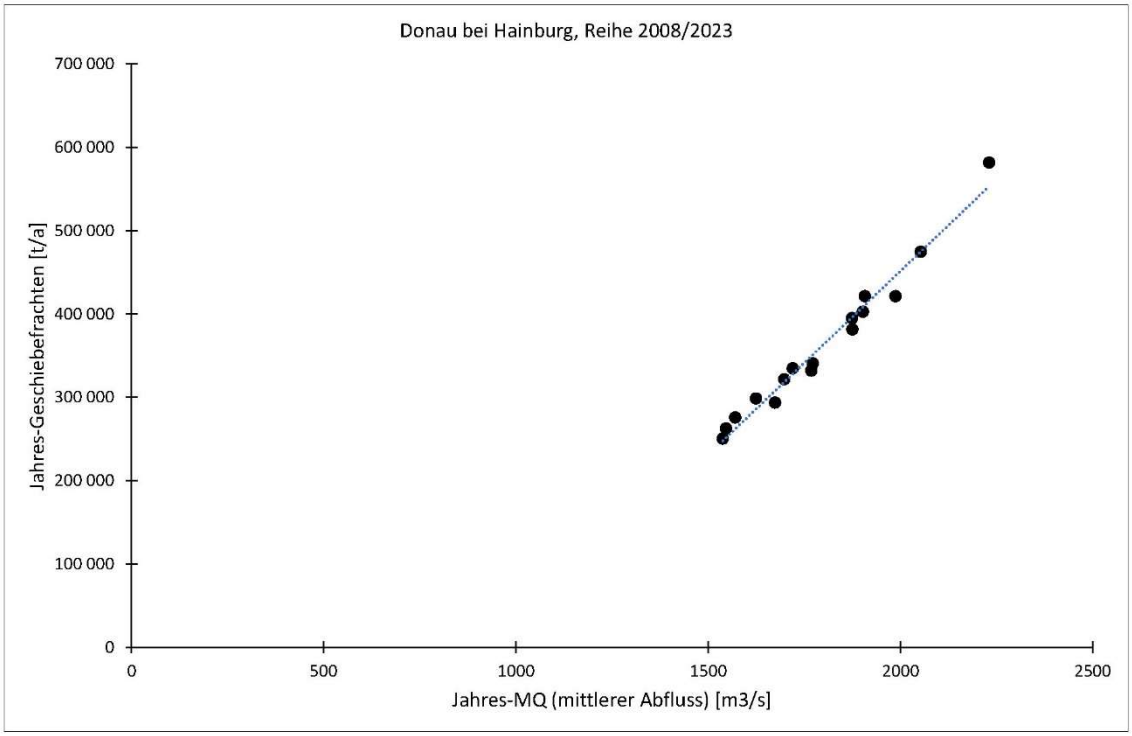


Abbildung 10: Zusammenhang zwischen den mittleren Jahresabflüssen am Pegel Hainburg und den Jahres-Geschiebefrachten an der Messstelle Hainburger-Straßenbrücke, Reihe 2008/2023

Es ist überraschend, wie straff dieser Zusammenhang ausfällt (im linearen Regressionsmodell: $R^2 = 0{,}974$). Aufgrund der grundsätzlich nichtlinearen Beziehung zwischen Abfluss und Geschiebetransport und der Tatsache, dass die Verteilungsfunktion (der Abflüsse) ja nicht vollständig durch ihren Mittelwert beschrieben werden kann, wäre durchaus mehr an Streuung zu erwarten. Aus theoretischer Sicht ist zu vermuten, dass diese Beziehung im Prinzip überlinear sein sollte.

3.3 Zur Geschiebetransportfunktion

In Abbildung 11 wird die Zuordnung zwischen den Tagesabflüssen (Tagesmittel) am Pegel Hainburg und den Geschiebe-Tagesfrachten an der Messstelle Hainburg-Straßenbrücke geplottet. Dabei wird sichtbar, dass diese Geschiebetransportfunktion mit Ausnahme der besonders hohen Abflüsse ($Q > 8000\ m^3/s$) einen S-förmigen Verlauf hat, und für sehr hohe Abflüsse folgt sie einer annähernd linear ansteigenden Funktion.

Tatsächlich wurden die über eHYD verfügbaren Werte durch Anwendung einer solchen zusammengesetzten Funktion auf die jeweiligen Abflüsse ermittelt[21]. Diese Transportfunktion wurde durch Anpassung von n=55 Geschiebemessungen der BOKU / IWA im Zeitraum 2006/2015 abgeleitet, wobei aufgrund der Struktur der Daten nicht der in der Fachliteratur häufig verwendete Potenzansatz gewählt wurde.

[21] Persönliche Mitteilung Dr. Tritthart (BOKU / IWA) vom 22.01.2025 (weitergeleitet von Fr. Dr. Drabek, VHP).

Details zu den Messungen und Auswertungen sind in Liedermann et al. (2017)[22] angeführt. Die Messungen wurden mittels Geschiebefangkorb (basket sampler) vom BfG-Koblenz-Typ (mit Anpassungen und Maschenweite 1 mm), jeweils mit 7 bis 12 Vertikalen im Querprofil, durchgeführt. Diese Messungen decken einen sehr weiten Durchflussbereich ab, zwischen Niederwasser (bei rund 1000 m^3/s) und einem Extremhochwasser (Juni 2013), dessen Scheitelabfluss mit ca. 10.738 m^3/s etwa ein HQ_{200} erreichte. Eine relativ gute Anpassung der Messergebnisse wurde mit einer Sigma-Typ-Funktion erzielt, mit einem Plateau bei bzw. knapp über dem bordvollen Zustand (ca. 5130 m^3/s), bis zu etwa 8000 m^3/s (ca. HQ_{15}), und ab dort einem starken und annähernd linearen Anstieg. Das wird u.a. mit dem Verlauf der Sohlschubspannungen (nach numerischen Berechnungen) begründet, die ab dem bordvollen Zustand annähernd konstant bleiben und erst über den HQ_{10} wieder ansteigen (Liedermann et al., 2017).

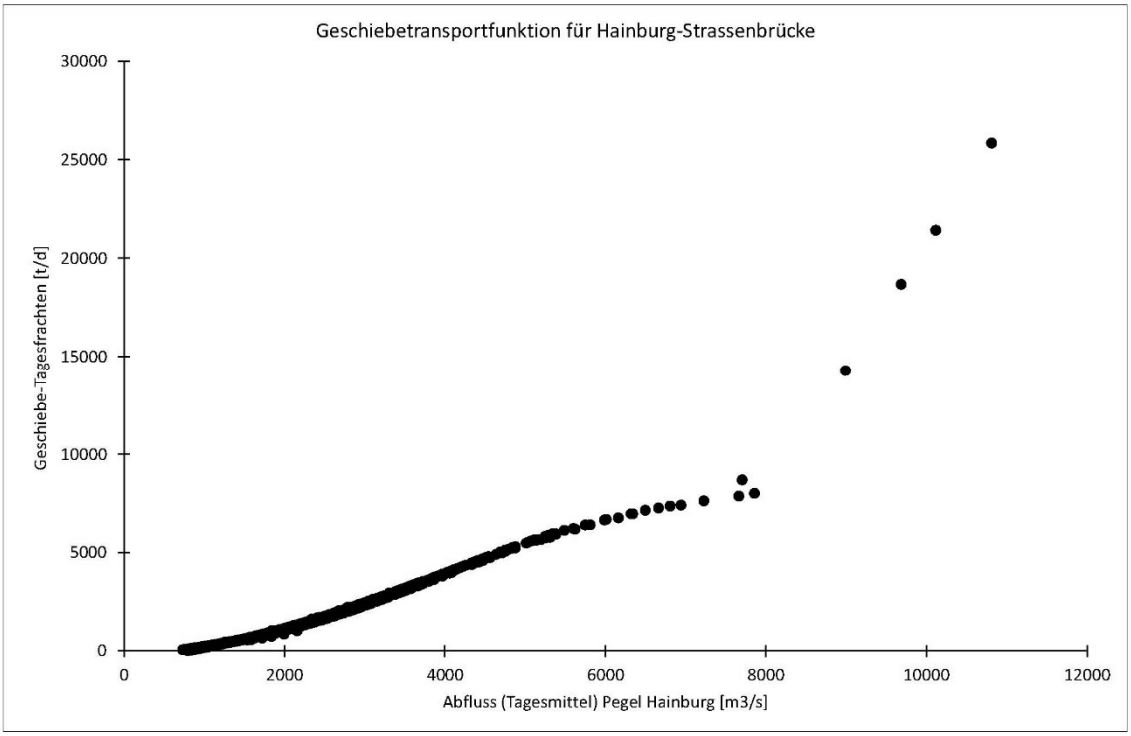


Abbildung 11: Geschiebefrachten, Tageswerte (Hainburg-Straßenbrücke) versus Abflüsse (Pegel Hainburg, Tagesmittel), Reihe 2008/2023; Werte gem. eHYD

3.4 Rekonstruktion der Geschiebefrachten früherer Jahre (ab 1996)

Mit einer solchen Geschiebetransportfunktion $GF = f(Q)$ können auch Geschiebefrachten für Zeiträume, für die (über eHYD) noch keine Daten vorliegen (hier also vor 2008), ermittelt werden. Dies immer unter der Annahme, dass die Geschiebetransportfunktion auch auf diese Phase anwendbar ist, dass also damals annähernd die gleichen geschiebehydraulischen Verhältnisse wie in der durch Messung abgedeckten Periode gegeben waren. Außerdem werden (als unabhängige Variable) die Durchflüsse benötigt, was beim Pegel Hainburg bis zurück zum Jahr 1977 möglich ist; für noch frühere Phasen

[22] Liedermann, M., Gmeiner, P., Kreisler, A., Tritthart, M., & Habersack, H. (2017). Insights into bedload transport processes of a large regulated gravel-bed river. *Earth Surface Processes and Landforms*, *43*(2), 514-523.

könnte man mit den Abflüssen bei Wien (ggf. mit Berücksichtigung der Zuflüsse über Schwechat und Fischa) arbeiten.

Mit diesem Ansatz werden im Folgenden die Geschiebefrachten für den Zeitraum 1996/2007 rechnerisch ergänzt. Hintergrund für diese Auswertung ist die weiter oben (unter Kap. 3.2) genannte Diskrepanz zwischen den langfristig gemittelten Frachten (für die Phase 2008/2023) und den früher (speziell über BMNT, 2018) angegebenen höheren Werten und die Beobachtung, dass die letzten Jahre eher trocken und damit weniger transportwirksam waren. Mit anderen Worten, es soll hier abgeschätzt werden, ob diese Diskrepanz für einen längeren (und im Abfluss stärkeren) Untersuchungszeitraum wegfällt oder wenigstens deutlich geringer ausfällt.

Unter Anwendung der aus den Daten für 2008/2009 rekonstruierten Geschiebetransport-Funktion erhält man schließlich die in Abbildung 12 geplotteten ergänzten Geschiebefrachten für 1996 bis 2007, die dort gemeinsam mit den bereits bekannten Werten dargestellt werden, womit schließlich der gesamte Zeitraum 1996/2023 abgedeckt ist.

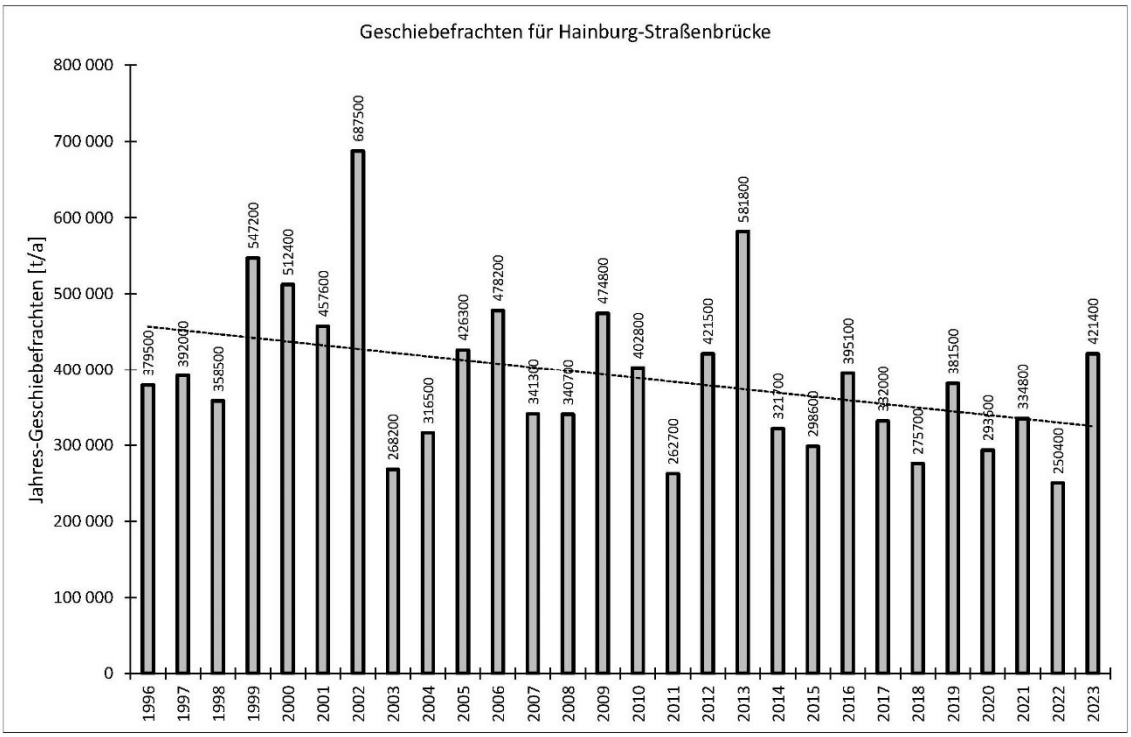


Abbildung 12: Zeitreihe der Jahres-Geschiebefrachten der Reihe 1996/2023 an der Messstelle Hainburg-Straßenbrücke; die Werte vor 2008 werden über die GT-Funktion und die Anwendung der Tagesabflüsse (1996/2007) auf diese ergänzt; ab 2008 werden die Werte gesetzt, die sich über die eHYD-Daten ergeben (und bereits in Abbildung 9 geplottet wurden)

Der Mittelwert des Geschiebetransports für diese Reihe 1996/2023 liegt bei 12,40 kg/s (bzw. 391.200 t/a): die Standardabweichung liegt bei 3,294 kg/s. Damit und mit $n = 28$ kann ein 95%-Vertrauensbereich von $[11{,}12;\ 13{,}67]$ kg/s abgegeben werden, bzw. 350.900 bis 431.500 t/a.

Der Mittelwert (von 391.200 t/a) ergibt mit Lagerungsdichten von 1700 bzw. 1800 kg/m^3 volumetrische Transportraten von 230.100 bzw. 217.300 m^3/a. Damit wird die Diskrepanz gegenüber dem Wert von 260.000 m^3/a in BMNT (2018) geringer; die restliche Abweichung ist offensichtlich darauf

zurückzuführen, dass in dieser Donaustrecke stärkere Abriebverluste als in BMNT (2018) angesetzt, gegeben sind, vgl. auch Kap. 2.8.

In Abbildung 12 ist auch erkennbar, dass 2002 und 2013, also Jahre mit Extremhochwässern, besonders hohe Frachten hatten. Insgesamt ist aber mit der Sigma-Funktion der Einfluss von Phasen mit höheren Abflüssen (bis 8000 m^3/s) geringer, als sich dies mit einer Potenzfunktion ergeben würde.

Für diese Zeitreihe ist ein fallender Trend deutlich erkennbar (Trendstärke ca. -4820 m^3/a pro Jahr; in der Abbildung über eine lineare Regressionsgleichung visualisiert). Dieser Trend ist eine direkte Folge der fallenden Trends bei den (mittleren) Abflüssen. In Klasz & Baumgartner (2024)[23] und Klasz (2025) wird der Trend der Jahres-MQ näher untersucht; für Hainburg und die Reihe 1996/2023 ist der Trend statistisch signifikant ($\alpha = 0{,}10$; Mann-Kendall-Test) und hat eine Trendstärke (Sen-Slope) von ca. $\beta_{MQ} = -10{,}3$ $(m^3/s)/a$ (Klasz, 2025). Dieser fallende Trend hat über die letzten zwei bis drei Jahrzehnte dazu beigetragen, dass die früher höheren Eintiefungsraten nun geringer ausfallen; andererseits war die damit verbundene Reduktion des Transportvermögens auch in Kombination mit den Verbesserungen beim Geschiebemanagement noch nicht ausreichend, die Sohlerosion vollständig zu beenden (Klasz, 2025).

[23] Klasz, G., C. Baumgartner (2024): Trends bei Wasserständen und mittleren Abflüssen in der Donau östlich von Wien und donaunahen Grundwasserständen: Starke Effekte durch Sohlerosion und Klimawandel. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, doi.org/10.1007/s00506-024-01090-z.

4 Kornverkleinerung im Längenschnitt, Abrieb und Sortierung

Im Folgenden wird zunächst die Kornverkleinerung in der Untersuchungsstrecke in Fließrichtung (downstream fining) behandelt. Diese Frage ist für die Geschiebebewirtschaftung dann von besonderem Interesse, wenn Geschiebe am unteren Rand der Strecke gebaggert und weiter stromauf verklappt wird (Geschieberückführungen), weil damit tendenziell feinkörnigeres Material verwendet wird, das (etwas) weniger wirksam in Bezug auf die Sohlstabilität wirkt. Möglichkeiten einer physikalisch begründeten Modellierung dieses Effekts werden im Kap. 5 behandelt; hier geht es um die quantitative Erfassung und Beschreibung der Kornverkleinerung bzw. um den zugehörigen Parameter c_D (bezogen auf Korndurchmesser) bzw. c_V (bezogen auf Kornvolumina).

Für die Geschiebebilanz (vgl. Kap. 2 und 3) sind hingegen nur die Abriebverluste von Bedeutung. Die Kornverkleinerung (in Fließrichtung) wird im Allgemeinen durch die Summenwirkung von Abrieb und Sortierung bestimmt, aber ein mengenmäßiger „Verlust“ tritt nur durch den Abrieb auf; dabei geht Geschiebe „verloren“, weil es in feinere Anteile (Schwebstoffe, event. auch gelöste Stoffe) übergeführt wird und damit für die bettbildenden Prozesse nicht mehr zur Verfügung steht.

Der Abriebkoeffizient a_V, der das beschreibt, ist also kleiner oder höchstens gleich dem Verkleinerungskoeffizienten c_V, also $a_V \leq c_V$, kann aber nicht einfach aus charakteristischen Korndurchmessern (im Längsverlauf) ermittelt werden. Im Rahmen dieser Studie wird ein plausibler a_V-Koeffizient primär über die Geschiebebilanz (im Längsverlauf differenziert, Kap. 2) und die Kontrollbedingung für Hainburger Straßenbrücke (Kap. 3) abgeleitet.

Im ersten Schritt werden hier die Kornverkleinerungsbeiwerte c_D bzw. c_V aus den charakteristischen Korndurchmessern[24] von Sohlproben abgeschätzt.

4.1 Allgemeine Hinweise, analytische Beschreibung

In Kiesflüssen nehmen die Korngrößen des Geschiebes und des Sohlmaterials im Längsverlauf deutlich ab, dies wird durch Abrieb und häufig auch durch Sortierprozesse verursacht. Sternberg (1875)[25] beschreibt das für den charakteristischen Korndurchmesser D (für den man die D_{50} setzen kann) mit dem analytischen Ansatz:

$$D_x = D_0 \cdot e^{-c_D \cdot x} \tag{4.1}$$

wobei D_0 der Wert am oberen Rand der untersuchten Strecke ($x = 0$) und D_x der Wert nach einer Distanz x [km] in Fließrichtung ist. c_D $[km^{-1}]$ ist für einen Flussabschnitt eine Konstante und wird Verkleinerungsfaktor (downstream fining rate) genannt.

Trägt man die charakteristischen Korndurchmesser von (möglichst vielen) Sohlproben im Längenschnitt auf, dann liefert eine Anpassung der Daten gem. Gl. (4.1) den Verkleinerungsfaktor; rechentechnisch erfolgt das normalerweise durch lineare Regression mit den Logarithmen der Korndurchmesser $\ln(D_i)$; die Steigung der Regressionsgeraden (im halblogarithmischen Maßstab) entspricht dann dem Verkleinerungsfaktor c_D.

---

[24] Hier im Plural, weil man mit unterschiedlichen Parametern auch unterschiedliche Verkleinerungsfaktoren erhält bzw. sich die Werte auch im Lauf der Zeit ändern können.

[25] Sternberg, H. (1875): Untersuchungen über Längen- und Querprofil geschiebeführender Flüsse. Zeitschrift für Bauwesen, Vol.25, pp.483-506.

Für verschiedene Überlegungen benötigt man einen auf das Volumen (bzw. die Masse) bezogenen Verkleinerungsfaktor c_V. Bleibt die Form der Körner im Längsverlauf gleich, dann folgt das Kornvolumen V dem Korndurchmesser D entsprechend des Skalengesetzes

$$V \propto D^3 \tag{4.2}$$

also (mit den Rechenregeln für Potenzen):

$$V_x = V_0 \cdot e^{-c_V \cdot x} = V_0 \cdot e^{-(3 \cdot c_D) \cdot x} \tag{4.3}$$

d.h.

$$c_V = 3 \cdot c_D \tag{4.4}$$

(vgl. z.B. Mikos, 1993)[26]. Um Verwechslungen zu vermeiden, sollte immer angegeben werden, ob es sich um durchmesser- oder volumenbezogene Beiwerte (Index „D“ oder „V“) handelt.

Aus Fallbeispielen (u.a. Mikos, 1993) ist bekannt, dass die Grobkornfraktion meist stärker in Längsrichtung abnimmt als ein mittlerer Korndurchmesser, während die feineren Fraktionen (z.B. die Sandfraktion) in Längsrichtung eher zunehmen oder annähernd gleich bleiben. Abbildung 13 zeigt das mit Daten aus Ingenieurbüro Zottl & Erber (1987) für die Donau östlich von Wien. Es ist also wichtig anzugeben, auf welchen Parameter sich der Sternberg-Ansatz (bzw. die Anpassung der Daten) bezieht. In Abbildung 14 sind sowohl die D_{50}-Werte als auch die D_{90}-Werte aufgetragen, und die daraus abgeleiteten Kornverkleinerungsfaktoren sind etwas unterschiedlich, vgl. auch Anhang A

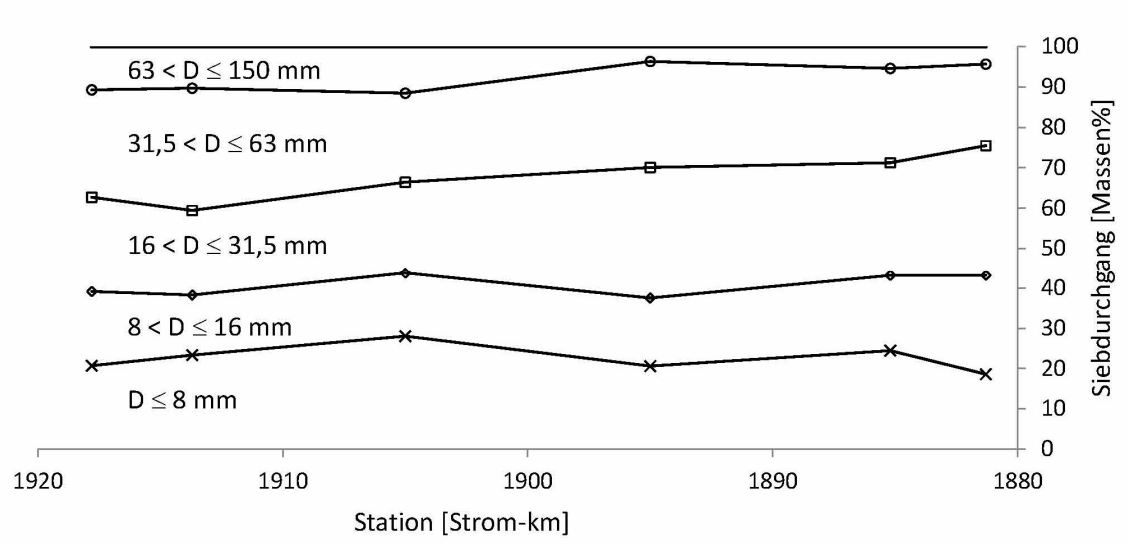


Abbildung 13: Kornfraktionen im Längenschnitt der Donau zwischen Wien-Freudenau und Marchmündung (Strom-km 1880) mit profilgemittelten Werten (Basisdaten von den Proben nach Ingenieurbüro Zottl & Erber, 1987); aus: Klasz et al. (2017)

[26] Mikoš, M. (1993): Fluvial abrasion of gravel sediments. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Band 123.

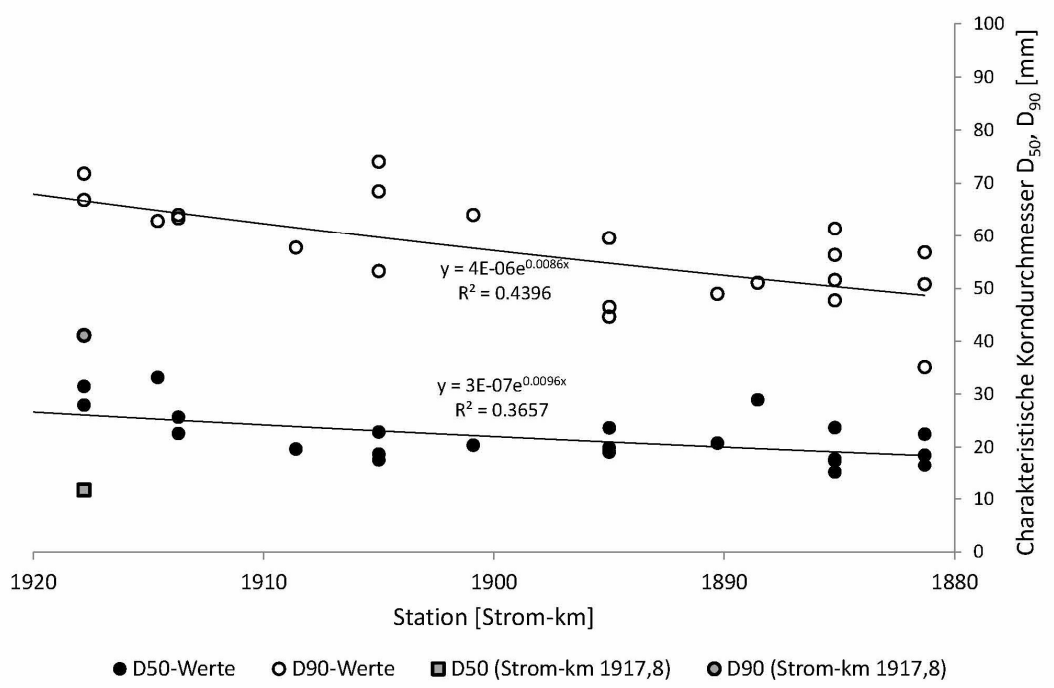


Abbildung 14: D_{50}- und D_{90}-Werte aller 24 Sohlproben (Ingenieurbüro Zottl & Erber, 1987) der Strecke zwischen Strom-km 1921 (wo einige Jahre nach der Probennahme das Kraftwerk Freudenau gebaut wurde) und der Marchmündung (Strom-km 1880) im Längenschnitt, halblogarithmische Darstellung, und Anpassung der Daten (ohne Probe S23, die als Ausreißer zu bewerten ist) nach dem Sternberg-Ansatz; aus: Klasz et al. (2017)

Solche Auswertungen zeigen zumeist starke Streuungen, was verschiedene Gründe haben kann (sh. weiter unten), und auch die in der Fachliteratur genannten Ergebnisse bzw. Erfahrungswerte sind sehr unterschiedlich, vgl. Tab. 3 (mit Vergleichswerten).

Oft kann ein Teil der Streuung durch Geschiebeeinträge aus Zubringern oder anderen seitlichen Quellen oder auch menschliche Eingriffe (z.B. Stauanlagen, in deren Unterwasser Sohlvergröberung / Deckschichtbildung zu beobachten ist) zurückgeführt werden, vgl. u.a. Surian (2002)[27]. Auch petrographische Unterschiede (Gesteinsarten und deren Mischung) haben großen Einfluss auf den Abrieb, vgl. u.a. Mikos (1993) und Attal & Lave (2009)[28].

Außerdem beeinflussen sedimenthydraulische Faktoren (speziell der Verlauf der Sohlschubspannungen im Längsverlauf) die Sortierprozesse. Starke Sortierung über selektive Auflandung (in Auflandungsstrecken) sollte höhere Werte für die Verkleinerungsfaktoren ergeben (Surian, 2002; Constantine et al., 2003)[29], andererseits sollten die Verkleinerungsfaktoren in Erosionsstrecken kleiner ausfallen (Klasz et al., 2017).

---

27 Surian, N. (2002): Downstream variation in grain size along an Alpine river: analysis of controls and processes. Geomorphology, 43 (2002), 137-149.

28 Attal, M., and J. Lavé (2009), Pebble abrasion during fluvial transport: Experimental results and implications for the evolution of the sediment load along rivers, J. Geophys. Res., 114, F04023, doi:10.1029/2009JF001328.

29 Constantine, C., Mount, J. F., & Florsheim, J. L. (2003): The effects of longitudinal differences in gravel mobility on the downstream fining pattern in the Cosumnes River, California. The Journal of geology, 111(2), 233-241.

In der Definition (zu Beginn dieses Kapitels) wurde offen gelassen, ob Proben aus Geschiebe (speziell aus Fangkorbmessungen) oder aus Sohlmaterial gezogen wurden. Die Sieblinien beider Kategorien können in Kiesflüssen sehr ähnlich oder aber recht unterschiedlich ausfallen, vgl. speziell Lisle (1995)[30]. Das korrespondiert mit dem Zutreffen oder Nichtzutreffen der „Equal-mobility"-Hypothese (Parker & Klingeman, 1982)[31] und damit mit dem Prozess der Deckschichtbildung. Lisle (1995) definiert einen Verhältniswert

$$D_* = D_{50,b}/D_{50,t} \tag{4.5}$$

mit $D_{50,b}$ dem mittleren Korndurchmesser des Untermaterials (subsurface bed material) und $D_{50,t}$ dem mittleren Korndurchmesser des Geschiebes (bed load) und findet dafür in 13 Kiesflüssen Werte $0{,}90 \leq D_* \leq 3{,}3$. Mit großen Einzugsgebietsgrößen bzw. großen bordvollen Abflüssen sinkt dieser Verhältniswert D_* gegen 1; das trifft für alle von Lisle (1995) angeführten größeren Flüsse (Tanana River; Redwood Creek; Ohau River; Goodwin Creek) zu.

In dieser Studie werden generell Daten aus Sohlproben (d.h. Bettmaterial) verwendet. Deckschichtbildung ist in der Donau östlich von Wien nicht sehr deutlich ausgeprägt (Liedermann et al., 2012; 2017; Klasz et al., 2017); und dennoch sollte ein Teil der Streuung der Daten auch damit bzw. mit anderen Formen kleinräumiger bzw. vertikaler Sortierung (z.B. auch Kiesdünen) zusammenhängen.

Einige Prozesse, die die Korngrößenverteilung an der Sohloberfläche beeinflussen, wie etwa Deckschichtbildung oder Sortierprozesse im Zuge von Transportkörpern (Kiesdünen), laufen vergleichsweise rasch ab und sind grundsätzlich instationär. Damit wäre eine stärkere zeitliche Variabilität verbunden, im Besonderen auch eine Abhängigkeit von der Abflussvorgeschichte. Die Studie des Ingenieurbüros Zottl & Erber (1987) zeigt auf Basis von Abschätzungen nach Günter (1971)[32], dass eine reife Deckschichte in dieser Strecke bereits bei mittleren Hochwässern (etwa 5.500 m^3/s) aufreißen würde; umgekehrt könnte es bei länger dauernden Phasen mit geringeren oder nur mittleren Abflüssen zur stärkeren Deckschichtbildung kommen.

Unter Berücksichtigung der Fachliteratur und der deutlich streuenden Ergebnisse auch in dieser Strecke sollten Verkleinerungsfaktoren eher im Sinn einer Bandbreite angegeben werden und daraus abgeleitete Größen eher über eine Sensitivitätsanalyse behandelt werden.

---

30 Lisle, T. E. (1995): Particle size variations between bed load and bed material in natural gravel bed channels. Water Resources Research, Vol. 31 (4), 1107-1118.

31 Parker, G., & Klingeman, P. C. (1982). On why gravel bed streams are paved. Water Resources Research, 18(5), 1409-1423.

32 Günter (1971): Die kritische mittlere Sohlenschubspannung bei Geschiebemischungen unter Berücksichtigung der Deckschichtbildung und der turbulenzbedingten Sohlenschubspannungsschwankungen; Mitteilungen VAW Zürich.

Tabelle 3: Vergleichswerte (Auswahl) aus der Fachliteratur für die Verkleinerungskoeffizienten c_D für größere Kiesflüsse (Felddaten), speziell auch Rhein und Donau

Fluss:	Lg: [km]	c_D $[km^{-1}]$	Referenz:	Anm.:
Alpenrhein (Ilanz / Chur)	35	0,0146	Keller (1916), zitiert nach Mikos (1993)	bezieht sich auf D_{max}
Alpenrhein (Chur / Illmündung)	63	0,0139		bezieht sich auf D_{max}
Alpenrhein (Illmünd. / Bodensee)	55	0,0176		bezieht sich auf D_{max}
Alpenrhein (Landquart / Illmünd.)	42	0,0157	Mikos (1993)	bezieht sich auf D_m
Alpenrhein	42	0,0153	Meyer-Peter & Lichtenhahn (1963)	
Rhein (km 260,9)	-	0,0029	Sternberg (1875), zitiert nach Mikos (1993)	mittlere Korndurchmesser
Rhein (Basel / Mannheim)	-	0,0052		maximale Korndurchmesser
bayerische Donau (Lechmündung)	20	0,0028	Bauer (1965)	vom c_V rückgerechnet, $c_D = c_V/3$
bayerische Donau (Regensburg)	20	0,0032		
bayerische Donau (Isarmündung)	20	0,0042		
Donau (Linz – Bad Deutsch Altenburg)	273	0,0077	Schocklitsch (1935)	aus HZB (1937)-Daten und über längere Strecke ermittelt; von von c_V rückgerechnet, $c_D = c_V/3$
Donau, Tullner Feld (km 1985 / 1964,8)	~20	0,0103		vom c_V rückgerechnet, $c_D = c_V/3$
Donau bei Wien (km 1938,85 / 1917,5)	~14	0,0231		
Donau stromab von Wien (km 1908,5 / 1888,0)	~20	0,0070		
Donau Wien Nußdorf – Marchmündung)	33	0,0046	Zottl & Erber (1987)	bezieht sich auf D_m; vom c_V rückgerechnet, $c_D = c_V/3$ (mit c_V~0,0137 km^{-1};
Ungarische Donau (km 1855 / 1806)	49	0,0033	Bogárdi (1974)	vom $c_V = 0{,}01$ rückgerechnet, $c_D = c_V/3$; eher im Sinn einer groben Abschätzung
Piave River	~50	0,027	Surian (2002)	Abrieb + Sortierung

4.2 Daten gem. HZB (1937) für den Zustand vor Kraftwerkserrichtung

Die frühesten bekannten Angaben zu Kornverteilungslinien in der österreichischen Donau sind über eine Untersuchung des Hydrographischen Zentralbüros (im Folgenden: HZB (1937))[33] verfügbar. Allerdings liegen diese Daten nur für relativ wenig Stationen vor ($n = 26$), und ohne zusätzliche

[33] Hydrographisches Zentralbüro (1937): Schwebstoff- und Geschiebeaufnahmen einiger österreichischer Flüsse; im Selbstverlag des Hydrographischen Zentralbüros.

Informationen (Entnahmezeitpunkt, genaue Lage im Querschnitt, Mengen; Entnahme- und Auswertemethoden).

Aufgrund einer Anmerkung in Schocklitsch (1935) ist zu schließen, dass diese „Geschiebeaufnahmen" vom Bundesstrombauamt im Jahr 1930 (bzw. in Oberösterreich 1927 und 1929 von der hydrographischen Landesabteilung in Linz) durchgeführt wurden.

Rosenauer (1946) erläutert zur Probennahme: *„[…] An ausgewählten Flussstellen wurden bei Niederwasser Geschiebeproben auf den Schotterhaufen in der Nähe des Wasseranschlages entnommen, nach dem man vorher die deckende Schichte abgehoben hatte. Man konnte so annehmen, die natürliche Geschiebefracht erfasst zu haben. Das Gemisch – es waren jeweils etliche hundert Kilo – wurde dann gesiebt und sortiert, so dass der Anteil jeder Kornfraktion am Gesamtgemisch herausgeschält wurde […]"*

In Abbildung 15 werden die aus diesen Daten (Sieblinien) abgeleiteten charakteristischen Korndurchmesser (D_{50},- D_{90} und D_{max}) geplottet. Entlang der gesamten österreichischen Donau und für den D_{50} kann daraus ein Verkleinerungsfaktor c_D von rund 0,0023 km^{-1} abgeleitet werden (für D_{90}: c_D~0,0019 km^{-1}; für D_{max}: c_D~0,0014 km^{-1}).

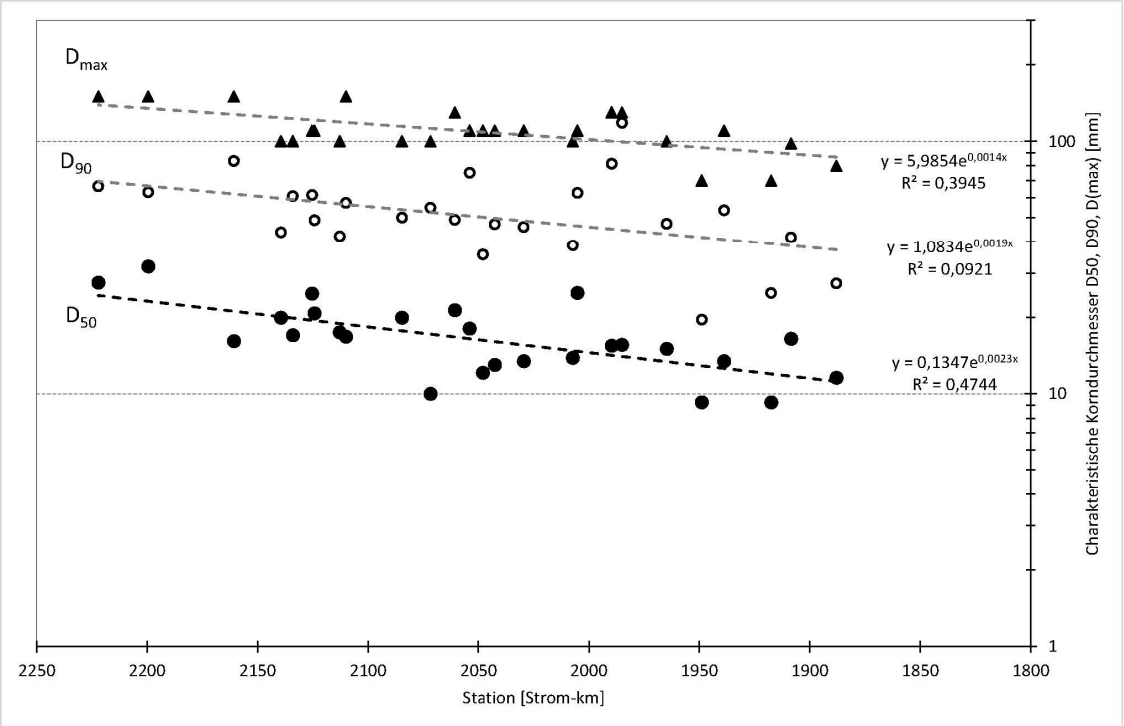


Abbildung 15: Charakteristische Korndurchmesser (D_{50}; D_{90}; D_{max}) aller Sohlproben aus HZB (1937) für die österreichische Donau zwischen Innmündung (km 2222,1) und Deutsch Altenburg (km 1888,0) im Längenschnitt, halblogarithmische Darstellung, Zustand vor dem Bau der Donaukraftwerke, aber nach der Regulierung;

4.3 Daten gem. Ingenieurbüro Zottl & Erber (1987)

Die erste Untersuchung mit einem umfangreichen Datenmaterial zu den Korngrößen der Donausohle bei Wien und östlich davon wurde 1986/1987 vom Ingenieurbüro Zottl & Erber (im Auftrag der Stadt Wien) durchgeführt, mit dem Ziel, flussbauliche Möglichkeiten zur Sohlstabilisierung zu überprüfen bzw. zu konzipieren.

Zwischen 14. und 17. Juli 1987 wurden insgesamt 33 Proben zwischen Wien-Nußdorf und Marchmündung entnommen, davon entfielen 24 Proben auf die Strecke zwischen Strom-km 1921 und 1880, also auf die heutige freie Fließstrecke. Dadurch wurde der Zustand vor Errichtung des Donaukraftwerkes Freudenau (Vollstau 1997), aber nach Bau der Kraftwerke stromauf, also u.a. Altenwörth (Strom-km 1980; Vollstau 1976) und Greifenstein (Strom-km 1949; Vollstau 1984) dokumentiert.

Die Entnahme erfolgte von einem Schiffsverband der Wasserstraßendirektion (Negrelli, Kronau, Inn) mittels eines nach unten dicht schließenden Polypgreifers; damit war sichergestellt, dass Feinteile bei der Entnahme nicht ausgewaschen wurden. In den drei Monaten vor der Entnahme hatten erhöhte Abflüsse zwischen zumeist 2500 und 4200 m³/s vorgeherrscht (typisch für die Jahreszeit), also deutlich über MQ, es war also eine Phase stärkerer Geschiebeführung. Pro Probe wurden etwa 500 bis 650 kg im Labor gesiebt (Ingenieurbüro Zottl & Erber, 1987; vgl. auch Klasz et al., 2017). Für den Kornverkleinerungskoeffizienten (Volumen) c_V wird in Ingenieurbüro Zottl & Erber (1987) durch Anpassung der D_m -Werte (maßgebender Korndurchmesser nach Meyer-Peter) $c_V \sim 0{,}0137$ [km^{-1}] angegeben; dem entspricht ein $c_D \sim 0{,}0046$ [km^{-1}] (Durchmesser-Verkleinerungskoeffizient).

Eine Reanalyse der Daten, nun bezogen auf die D_{50} und die D_{90}, die Strecke flussab von Strom-km 1921 (also ohne die Proben aus dem heutigen Stauraum Wien) und ohne Berücksichtigung eines Ausreißers (S23 bei Strom-km 1917,8) ergibt einen Verkleinerungskoeffizient für D_{50} von $c_D \sim 0{,}0096$ [km^{-1}] und für den D_{90} einen Wert von $c_D \sim 0{,}0086$ [km^{-1}] (Klasz et al., 2017), sh. auch Tab. 4. Die Daten wurden bereits weiter oben in Abbildung 14 graphisch dargestellt.

4.4 Daten gem. BOKU,-IWA & Ingenieurbüro Klasz (2022)

Im Auftrag der viadonau wurden 2020 in der Donau östlich von Wien insgesamt n=192 Sohlproben gewonnen und gesiebt. Die Untersuchung wurde von einer Arbeitsgemeinschaft aus BOKU, IWA und Ingenieurbüro Klasz durchgeführt. Es liegt dazu eine umfangreiche Dokumentation und Analyse (BOKU, IWA & Ingenieurbüro Klasz, 2022) vor.

Die Entnahmen erfolgten in zwei Entnahmekampagnen (14./17. April 2020 mit 150 Proben; 18./20. Oktober 2020 mit 42 Proben) mittels Zweischalengreifer (ca. 0,45 m³ bzw. ca. 6 m³ Fassungsvolumen; schwimmender Hydraulikbagger auf Stelzenponton, das mit Schubschiff bewegt wurde; Geräte und Schiffspersonal von Fa. Felbermayr).

Im Durchschnitt wurden pro Probe knapp über 200 kg gesiebt (Fa. Nievelt, staatlich akkreditierte Prüfanstalt; Siebsatz: 125 / 90 / 63 / 45 / 31,5 / 22,4 / 16 / 11,2 / 8 / 4 / 2 / 1 / 0,5 / 0,25 / 0,125 mm) und daraus kennzeichnende Korndurchmesser und andere Parameter abgeleitet.

Die D_{50} und D_{90} im Längenschnitt werden in Abbildung 16 und Abbildung 17 geplottet. In der Studie BOKU, IWA & Ingenieurbüro Klasz (2022) sind auch Auswertungen für andere charakteristische Korndurchmesser und Kenngrößen (D_{16}; D_{84}; D_{max}; $\sigma_{g;\dots}$) und zusätzliche Ergebnisse (u.a. petrographische Zusammensetzung; Lagerungsdichte) verfügbar, außerdem auch ähnliche Untersuchungen zur Wachau; dies wird hier nicht weiter behandelt.

Besondere Überlegungen wurden zur Festlegung der Entnahmeorte angestellt; dabei wurde ein Entnahme-Raster (links / mittig / rechts im Abstand von 2 km, alle gerade Strom-km und zusätzlich mittig an allen ungeraden Strom-km dazwischen) mit flussmorphologischen Kriterien (tieferreichende Kolke; Furten) und weiteren Kriterien (Entnahmen auch dort, wo Zottl & Erber-Proben gewonnen wurden; zusätzlich im Bereich der Geschiebefänge) kombiniert.

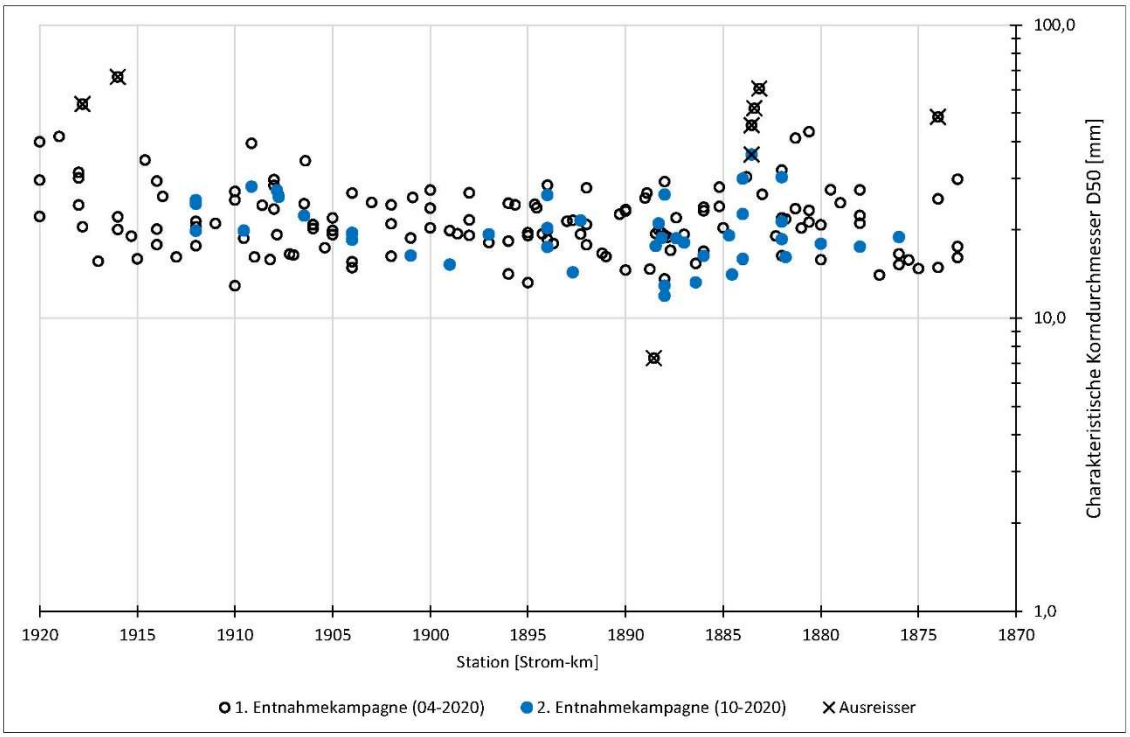


Abbildung 16: D_{50} aller ($n = 192$) Sohlproben der Donau östlich von Wien im Längenschnitt, halblogarithmische Darstellung, Daten aus BOKU, IWA & Ingenieurbüro Klasz (2021), erste Entnahmekampagne (April 2020) und zweite Entnahmekampagne (Oktober 2020)

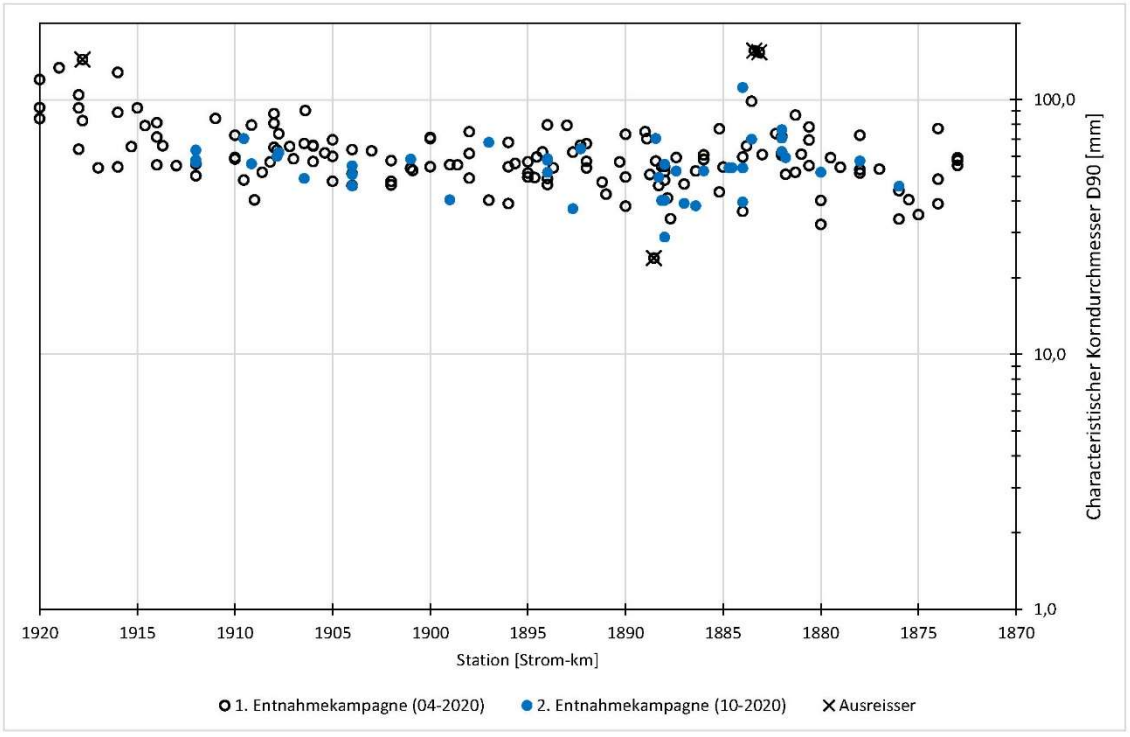


Abbildung 17: D_{90} aller ($n = 192$) Sohlproben der Donau östlich von Wien im Längenschnitt, halblogarithmische Darstellung, Daten aus BOKU, IWA & Ingenieurbüro Klasz (2021), erste Entnahmekampagne (April 2020) und zweite Entnahmekampagne (Oktober 2020)

Im obersten Teilabschnitt (VHP-Verklappbereich) und bei Hainburg, etwa bei Strom-km 1883 (querab des Braunsberges) gibt es einige Ausreißer nach oben und bei einem Entnahmeort (Strom-km 1888,5)

einen Ausreißer nach unten. Dazu gibt es in BOKU, IWA & Ingenieurbüro Klasz (2022) verschiedene weiterführende Hinweise.

4.5 Zusammenführen der Ergebnisse zum c_D-Wert

Die Ergebnisse verschiedener Varianten der Datenanpassung werden in Tab. 4 angegeben. Die c_D-Werte für den D_{50} erstrecken sich zwischen 0,0026 und 0,0096 km^{-1}.

Ein Teil der sehr starken Streuungen (d.h. die sehr kleinen Bestimmtheitsmaße R^2) kann über flussmorphologische Kriterien (Kolke eher grobkörniger; Furten eher feinkörniger) und wasserbaulichen Maßnahmen (grobkörniger in der VHP-Erhaltungsstrecke) erklärt werden, zum größten Teil sind diese Streuungen aber mit lokalen und kurzfristigen Sortierprozessen (temporäre Deckschichtbildungen und Geschiebetransport über Kiesdünen) und damit mutmaßlich mit stärkeren zeitlichen Schwankungen verbunden, insgesamt also zufällig (BOKU, IWA & Ingenieurbüro Klasz, 2022).

Auffällig ist auch, dass die erste Entnahmekampagne (2020) deutlich tiefere Werte als die zweite Entnahmekampagne erbrachte; dafür ist keine plausible Erklärung bekannt.

Tabelle 4: Gegenüberstellung der aktuell gefundenen Kornverkleinerungs-Koeffizienten für D_{50} und D_{90} (erste und zweite Entnahmekampagne, BOKU, IWA & Ingenieurbüro Klasz, 2022) mit den zugehörigen Werten aus den Daten der Studie des Ingenieurbüros Zottl & Erber (1986)

Stichprobe:	n=	D_{50}-Wert		D_{90}-Wert	
		c_{D50}	R^2	c_{D90}	R^2
Zottl & Erber (1987), alle Proben zwischen Strom-km 1921 und 1880, mit Ausreißer	24	0,0062	0,122	0,0066	0,244
Zottl & Erber (1987), Proben zwischen Strom-km 1921 und 1880, ohne Ausreißer	23	0,0096	0,366	0,0086	0,440
BOKU, IWA & Klasz (2022), erste Entnahmekampagne, mit Ausreißer	150	0,0026	0,012	0,0083	0,139
BOKU, IWA & Klasz (2022), erste Entnahmekampagne, ohne Ausreißer	143 (146)	0,0028	0,022	0,0085	0,150
BOKU, IWA & Klasz (2022), zweite Entnahmekampagne, mit Ausreißer	42	0,0055	0,057	0,0013	0,004
BOKU, IWA & Klasz (2022), zweite Entnahmekampagne, ohne Ausreißer	41	0,0069	0,103	0,0021	0,015
BOKU, IWA & Klasz (2022), erste Entnahmekampagne, Analyse für Punktraster (2 km Abstand) und profilgemittelte Sieblinien	24	0,0039	0,126	0,0112	0,498

Unter dem Eindruck der sehr starken Streuungen wurden in der Studie BOKU, IWA & Ingenieurbüro Klasz (2022) verschiedene Varianten für eine robuste Analyse zur Kornverkleinerung im Längsverlauf erprobt; u.a. wurde ein geometrisch-äquidistanter Probenpunktraster (alle geraden Strom-km, 1920, 1918, 1916, …, 1874) verwendet, wobei die jeweils drei Sieblinien (links / mittig / rechts) gemittelt, also profilgemittelte Sieblinien verwendet werden. Damit erhält man die in der letzten Zeile von Tab. 4 aufgelisteten Ergebnisse.

Die Auswertungen in Kap. 2 zum Abriebbeiwert liefern mit $a_V \sim 0{,}014\ km^{-1}$ in Verbindung mit der Bedingung $a_V \leq c_V$ bzw., auf Durchmesser bezogen, $a_D \leq c_D$ eine untere Grenze für c_D, und zwar $c_D \geq 0{,}0047\ km^{-1}$. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Abriebverluste mit den Abnahmen beim D_{50} in Beziehung gesetzt werden können.

In Klasz et al. (2017) wurde als plausibler Wertebereich (für die D_{50}) $c_D \sim 0{,}0062 \cdots 0{,}0096\ km^{-1}$ ermittelt, mit $c_D \sim 0{,}008\ km^{-1}$ als „beste Schätzung". Mit den neueren Daten und Auswertungen sind die Werte etwas tiefer anzusetzen, etwa im Bereich $c_D \sim 0{,}0047 \cdots 0{,}007\ km^{-1}$. Das passt auch weitgehend mit früheren Angaben zur Kornverkleinerung in der Donau (Tab. 3) zusammen.

Mit diesen c_D-Werten und im Vergleich mit dem Abriebbeiwert zeigt sich damit auch, dass Sortierprozesse im Längenschnitt eine geringe Rolle spielen, wie bereits früher, in Klasz et al. (2017) diskutiert.

Setzt man den $D_{50,o}$ im oberen Teil der Strecke (in der VHP-Erhaltungsstrecke) mit 25 mm an und rechnet man mit $c_D = 0{,}006\ km^{-1}$, dann erhält man für allfällige Baggerungen (Geschieberückführungen) im Bereich Hainburg, also etwa $x = 1915 - 1984 = 31$ km einen $D_{50,u}$-Wert von etwa

$$D_{50,u} = D_{50,o} exp(-c_D x) = 25 \cdot \exp(-0{,}006 \cdot 31) \sim 20{,}8\ mm \qquad (4.6a)$$

Für Baggerungen (Geschieberückführungen) knapp flussab der Marchmündung (ca. Strom-km 1879) wären es

$$D_{50,u} = D_{50,o} exp(-c_D x) = 25 \cdot \exp(-0{,}006 \cdot 36) \sim 20{,}1\ mm \qquad (4.6b)$$

5 Berücksichtigung von Geschiebezugaben mit abweichenden Korngrößen

Im Folgenden wird ein Ansatz entwickelt, mit dem auf physikalischer Basis die Wirksamkeit von Zugabematerialien unterschiedlicher Korngrößen (feinkörniger oder grobkörniger als das vorliegende Bettmaterial) abgeschätzt und nachvollziehbar dargestellt werden kann.

5.1 Motivation und Fragestellung

Das Bettmaterial der Donau wird durch eine (mittlere) Kornverteilung, also eine (mittlere) Sieblinie charakterisiert; man kann dazu auch charakteristische Korndurchmesser (z.B. D_{50}, D_m, D_{90}) angeben. Auf diese granulometrischen Verhältnisse beziehen sich die Aussagen zum Geschiebetransportvermögen und zum Geschiebedefizit (einer Strecke).

Im Rahmen einer Geschiebebewirtschaftung kann man auch gröberes oder feineres (relativ zum Bettmaterial) Material zugeben. Grobkörnigeres Material sollte weniger beweglich und daher (bezüglich Sohlstabilität) wirksamer sein, das ist die Grundidee der Sohlvergröberung (Klasz et al., 2009b)[34]. Mit feinkörnigem Material ist es gerade umgekehrt, es ist mobiler und daher weniger wirksam. Wird nun Geschiebe rückgeführt (aus Baggerungen bzw. Geschiebefängen weiter flussab), dann wird dieses Material grundsätzlich feinkörniger sein, denn es unterliegt zuvor ja dem Abrieb und ggf. auch einer Sortierung, insgesamt also einer Kornverkleinerung in Fließrichtung (downstream fining), vgl. Kap. 4. Man kann das über einen Effizienzfaktor ε, der vom jeweiligen Korndurchmesser abhängt, $\varepsilon = f(D)$, beschreiben:

$$\mathrm{M}_D = \varepsilon \cdot M_b \tag{5.1}$$

Dabei bezeichnet M_D die Wirkungen (in Bezug auf die Stabilität der mittleren Sohllage) der Zugabemenge mit Korndurchmesser D im Verhältnis zu einer Zugabemenge M_b mit dem vorliegenden Bettmaterial (Index b); beides quantifiziert in Zugabemengen pro Zeiteinheit, also $[m^3/a]$ (oder ähnlich).

Im Folgenden wird dafür ein Konzept, das bereits mit Klasz et al. (2017) entwickelt wurde, detailliert und auf die Donau östlich von Wien angewandt.

Mit diesen Überlegungen werden auch die Vorstellungen zum Geschiebetransport (in großen Flüssen) zum Thema. Es zeigt sich, dass die sehr einfache Vorstellung, dass das Geschiebe durch das strömende Wasser annähernd wie auf einem Förderband bewegt wird, in verschiedener Hinsicht zu kurz greift.

5.2 Ein empirischer Ansatz für den Effizienzfaktor, Daten zur Donau (östlich von Wien) und zum Oberrhein

Die Wirksamkeit eines Kornes in Bezug auf die Stabilität hängt davon ab, wie lange es in der betrachteten Strecke in der Sohle enthalten ist, also von seiner Aufenthaltsdauer Δt (residence time) und damit vom Kehrwert seiner mittleren Transportgeschwindigkeit V_t (der Index t hier für „travel“), die auch „virtuelle Geschwindigkeit“ genannt wird, vgl. Pkt. 5.3. Also:

---

[34] Klasz, G; Zottl, H.; Habersack, H. und Schmalfuß, R. (2009b): Die granulometrische Sohlverbesserung für die Donau östlich von Wien als spezielle Form der Geschiebebewirtschaftung. Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift (ÖIAZ), 154. Jg., Heft 1-6/2009.

$$\varepsilon = \mathrm{f}(D) \propto \Delta t \propto V_t^{-1} \tag{5.2}$$

Man könnte versuchen, Transportgeschwindigkeiten für unterschiedliche Korngrößen über numerische Modelle (mit fraktionsweisem Ansatz) zu berechnen. Dabei wirken sich aber verschiedene theoretische Unsicherheiten aus, im Besonderen auch die „equal-mobility"-Debatte, wo es für Kiesflüsse unterschiedliche Befunde gibt. Um diese Unsicherheiten zu vermeiden, baut der hier verfolgte Ansatz auf empirische Daten auf, und zwar primär auf die beim Pilotprojekt Bad Dt. Altenburg (also innerhalb unserer Untersuchungsstrecke) durch Beobachtung von Tracersteinen unterschiedlicher Größe im Radiofrequenzbereich ermittelten mittleren Transportgeschwindigkeiten (Liedermann et al. 2012, 2013)[35]. In Abbildung 18 werden (ganz ähnlich wie in Klasz et al., 2017) diese mittleren Tracer-Geschwindigkeiten abhängig von den Tracer-Korndurchmessern dargestellt und durch eine Potenzfunktion angepasst.

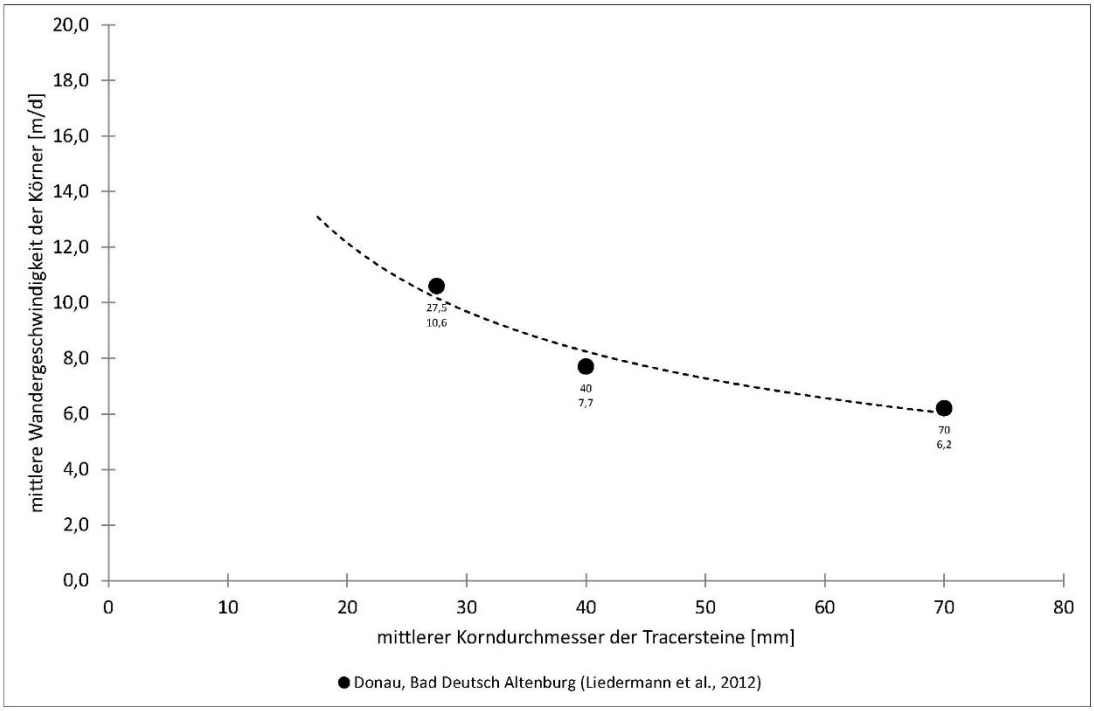


Abbildung 18: Abhängigkeit der langfristig mittleren Transportgeschwindigkeit vom Korndurchmesser auf Grundlage der Tracer-Steinmessungen (Prämonitoring) bei Bad Dt. Altenburg (Basisdaten: Liedermann et al. 2012) und Anpassung dieser Daten durch eine Potenzfunktion; Darstellung aus Klasz et al. (2017)

Der grundlegende Zusammenhang, dass sich größere Steine langsamer als kleinere Steine bewegen, ist wenig überraschend. Die Potenzfunktion für $\mathrm{V}_t\ [m/d]$ ergibt sich hier mit

$$\mathrm{V}_t = 72{,}7 \cdot D_t^{-0{,}59} \tag{5.3}$$

[35] Liedermann, D. M., Gmeiner, P., Niederreiter, R., Tritthart, M., & Habersack, H. (2012): Innovative Methoden zum Geschiebemonitoring am Beispiel der Donau. Österr. Wasser-und Abfallwirtschaft, 64 (11-12), 527-534.
Liedermann, M., Tritthart, M., & Habersack, H. (2013): Particle path characteristics at the large gravel-bed river Danube: results from a tracer study and numerical modelling. Earth Surface Processes and Landforms, 38(5), 512-522.

wobei der mittlere Korndurchmesser der Tracersteine D_t in [mm] einzusetzen ist. Es ist zu vermuten, dass der Exponent einen physikalischen Hintergrund hat bzw. auf Basis einer physikalisch fundierten Theorie ableitbar sein sollte, auch wenn das derzeit noch nicht bekannt ist.

Für die Donau stehen aber nur drei Stützstellen zur Verfügung (vgl. auch Anhang A). Die Vorgangsweise ist daher zunächst unzureichend fundiert, auch wenn sie ein plausibles Ergebnis liefert. Viel besser wäre es, wenn eine solche Anpassung auch auf theoretische Überlegungen oder auf zusätzliche Messungen gegründet wäre.

Ähnliche Daten liegen etwa auch für den Oberrhein, flussab der Staustufe Iffezheim (ca. km 337) vor. Dort wurde eine große Menge petrographischer Tracer (rd. 28.000 t, gebrochener Granitschotter) über drei Jahre (1996/1999) beobachtet; Daten liegen für fünf verschiedene Fraktionen (von 4/8 bis 45/63 mm) vor, sh. Gölz (2002)[36] und Promny et al. (2010)[37], vgl. auch Anhang A. In Abbildung 19 werden diese Daten mit denen aus unserer Strecke (Liedermann et al., 2012) verglichen. Als zugehörige Korndurchmesser werden die geometrischen Mittel aus den Fraktions-Untergrenzen $D_{i,u}$ und -Obergrenzen $D_{i,o}$ gesetzt:

$$\mathrm{D}_{i,m} = \sqrt{D_{i,u} D_{i,o}} \tag{5.4}$$

Obwohl sich die Methoden beider Studien und außerdem auch die hydrologischen und hydraulischen Verhältnisse (Strömungsintensitäten) in beiden Flüssen unterscheiden, passen die Werte erstaunlich gut zusammen. Das hängt damit zusammen, dass die Strömungsintensitäten und die mittleren Korndurchmesser D_b in beiden Flussabschnitten sehr ähnlich sind. Die Shields-Zahlen τ_* (vgl. auch Kap. 5.4) für den bordvollen Zustand liegt in beiden Fällen bei etwa $\tau_{*bf} \sim 0{,}05$. Das ist im Übrigen ein typischer Wert für den bordvollen Zustand von Kiesflüssen, für den es auch theoretische Begründungen gibt (Parker, 1979)[38].

Mit diesen Daten zeigt sich eine Abnahme der Partikel-Geschwindigkeiten V_t mit zunehmenden Korndurchmessern, übereinstimmend mit den Erwartungen, aber diese Abnahme fällt insgesamt relativ schwach aus.

---

[36] Gölz, E. (2002): Iffezheim field test – three years experience with a petrographic tracer. Proceedings of an international symposium held at Alice Springs, Australia, September 2002. IAHS Publ. no 276 – 2002.

[37] Promny, M.; Frings, M.; Gehres, N.; Busch, N.; Vollmer, S.; Gölz, E. (2010): Analyse und Bewertung der hydraulisch-morphologischen Situation zwischen Iffezheim und Mainz. Bericht, BFG-1702. Auftraggeber: Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest; BfG-SAP-Nr.: M39610304015.

[38] Parker, G. (1979). Hydraulic geometry of active gravel rivers. Journal of the Hydraulics Division, 105(9), 1185-1201.

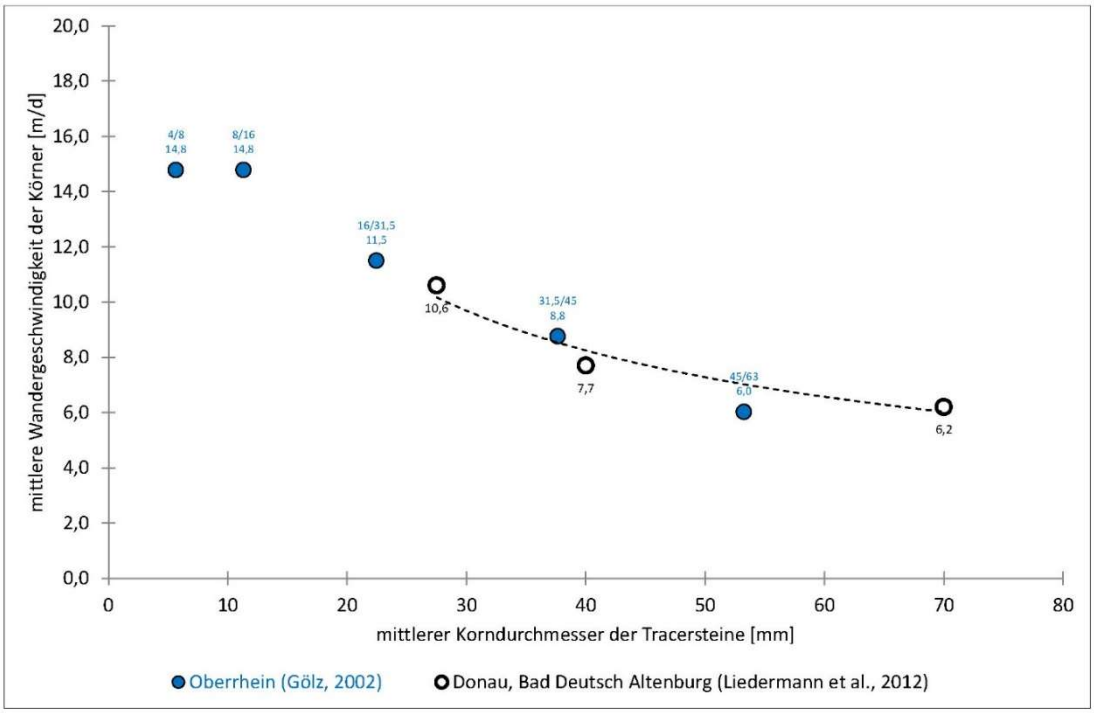


Abbildung 19: Abhängigkeit der langfristig mittleren Transportgeschwindigkeit vom Korndurchmesser auf Grundlage der Tracer-Steinmessungen der Donau bei Bad Dt. Altenburg (Liedermann et al. 2012) und der Tracermessungen im Oberrhein flussab von Iffezheim (Gölz, 2002)

Für die Interpretation dieser Daten ist sehr wichtig, dass das Bettmaterial, in dem die Tracer-Steine (unterschiedlicher Größe) eingebettet waren, immer gleich ist. Die unterschiedlichen Steindurchmesser beschreiben also nicht das Verhalten unterschiedlich grober Geschiebemischungen, sondern unterschiedlich großer Einzelsteine innerhalb eines jeweils gleich gehaltenen Bettmaterials. Der mittlere Korndurchmesser in der Donau (östlich von Wien) liegt bei etwa $D_b \sim 25$ mm und im Oberrhein (flussab von Iffezheim) bei etwa $D_b \sim 23{,}5$ mm (Felkel, 1972; Angabe für Untermaterial)[39] bzw. $D_b \sim 28$ mm (BM für Verkehr, 1987; Angabe für Geschiebe, graphisch aus Abb. 4.4-3 abgelesen)[40].

5.3 Unterschiedliche Arten von Geschwindigkeiten

Hassan et al. (1992)[41] und verschiedene andere Autoren (u.a. Ferguson et al., 2002)[42] verwenden den Begriff der „virtuellen Geschwindigkeit“ (bzw. „virtueller Bewegungsrate“: virtual rate of travel). Damit ist die Geschwindigkeit einzelner Steine über längere Untersuchungszeiträume definiert, einschließlich aller Ruhephasen. Man dividiert die Transportweite (zwischen zwei Aufnahmen) durch die Zeitdifferenz zwischen den Aufnahmen, wobei längere Beobachtungsperioden (z.B. Monate, Jahre) vorausgesetzt werden. Diese Geschwindigkeit entspricht also einer mittleren Transportgeschwindigkeit V_t und

39 Felkel, F. (1972): Das Sohlenkorn des Rheins zwischen Straßburg und Bingen. Mitteilungsblatt der BAW, 1972, H. 32, S. 77 – 87.

40 Bundesminister für Verkehr, Abteilung Binnenschifffahrt und Wasserstraßen, Bonn, Juli 1987: Untersuchung der Abfluss- und Geschiebeverhältnisse des Rheins. Schlußbericht.

41 Hassan, M. A., Church, M., & Ashworth, P. J. (1992). Virtual rate and mean distance of travel of individual clasts in gravel-bed channels. Earth surface processes and landforms, 17(6), 617-627.

42 Ferguson, R. I., Bloomer, D. J., Hoey, T. B., & Werritty, A. (2002). Mobility of river tracer pebbles over different timescales. Water Resources Research, 38(5), 3-1.

ist für unsere Fragestellung unmittelbar relevant. Das umfasst also auch alle Phasen, während der der betrachtete Stein (Tracer) tiefer im Sohlmaterial eingebettet ist.

Davon ist jene Geschwindigkeit u_t zu unterscheiden, die den eigentlichen Bewegungsvorgang eines Steins (gleitend, rollend, springend) beschreibt, also ohne Ruhephase, und der in verschiedenen Geschiebetransportformeln (z.B. Van Rijn, 1984)[43] eine Rolle spielt. Setzt man voraus, dass das Verhältnis u_t/u_* zwischen dieser Geschwindigkeit und der Sohlschubspannungsgeschwindigkeit $u_* = \sqrt{\tau/\rho}$ meist in der Größenordnung zwischen 3 und 10 liegt (abhängig von der Strömungsintensität; vgl. z.B. Van Rijn, 1984) und schätzt man die Schubspannungsgeschwindigkeit in der Donau mit (Größenordnung für MW bis HSW) etwa 0,10 bis 0,15 m/s ab, dann erhält man für diese Bewegungsphase Geschwindigkeiten im Bereich zwischen 0,3 und 1,5 m/s, also (wenn man mit einem mittleren Wert von 0,5 m/s rechnet, d.h. mit ca. 1800 m/h) in der Größenordnung fast 200-fach höher als die über Tracer gemessenen V_t.Mit dieser Abschätzung zeigt sich die dominante Bedeutung der bewegungslosen Phasen.

Darüber hinausgehend ist auch eine Geschwindigkeit für die Wanderung von Dünen (Kiesdünen) V_{TK} in Fließrichtung beobachtbar, vgl. Pkt. 5.7.

5.4 Weitere Daten und Versuch einer dimensionsanalytischen Fundierung

Ferguson & Wathen (1998)[44] und Ferguson et al. (2002) beschreiben Tracer-Versuche, die im Allt Dubhaig, einem kleinen schottischen Kiesfluss (etwa 10 m breit; bordvoller Abfluss ca. 11 m^3/s; Gefälle im Längsverlauf von ca. 0,017 auf 0,003 fallend) durchgeführt wurden. Dabei wurden 1460 Tracersteine (Steindurchmesser zwischen 16 und 256 mm; davon 1220 magnetisch; 240 nichtmagnetisch) verwendet. Die Untersuchungsperiode war mehrjährig, zunächst 1991/1993 (Ferguson & Wathen, 1998) und dann 1991/1999 (Ferguson et al., 2002). Dafür wurden, unterteilt in 6 Teilabschnitte (mit unterschiedlichem Gefälle), mittlere Transportweiten (auch abhängig von den Tracer-Steindurchmessern) bestimmt, daraus virtuelle Partikel-Geschwindigkeiten ermittelt und durch empirische Beziehungen angepasst.

Ergänzende Informationen zu diesen (bzw. ähnlichen) Messungen und den dabei erkennbaren Phänomenen (u.a. zur Verteilung der Bewegungsdistanzen und zur Dauer der bewegungslosen Phasen) findet man auch in Hassan et al. (2013)[45], auch dort auf Messungen im Allt Dubhaig gestützt.

Aber noch viel wichtiger als diese Daten sind im Folgenden die dimensionsanalytischen Überlegungen in Ferguson et al. (2002). Die Dimensionsanalyse wird zur Reduktion der Liste der involvierten Parameter verwendet (Parker & Anderson, 1977)[46]. Grundlage dafür bildet das Pi-Theorem von Buckingham

---

43 Van Rijn, L. C. (1984): Sediment transport, part I: bed load transport. Journal of Hydraulic Engineering, 110(10), 1431-1456.

44 Ferguson, R. I., & Wathen, S. J. (1998). Tracer-pebble movement along a concave river profile: Virtual velocity in relation to grain size and shear stress. Water Resources Research, 34(8), 2031-2038.

45 Hassan, M. A., Voepel, H., Schumer, R., Parker, G., & Fraccarollo, L. (2013). Displacement characteristics of coarse fluvial bed sediment. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 118(1), 155-165.

46 Parker, G., & Anderson, A. G. (1977). Basic principles of river hydraulics. Journal of the Hydraulics Division, 103(9), 1077-1087.

(1914)[47]: Wenn eine Gleichung mit k Variablen dimensionshomogen ist, dann kann sie auf eine Beziehung zwischen $k-n$ unabhängigen und dimensionslosen Produkten reduziert werden, wobei n die Mindestanzahl an Dimensionen ist, die zur Beschreibung der Variablen erforderlich sind (Munson et al., 1998)[48]. In unserem Fall, ähnlich wie bei den meisten Problemen der Hydromechanik oder Sedimenthydraulik, ist n=3: [Länge], [Zeit] und [Masse].

Das Pi-Theorem bildet auch eine Basis für die Modellhydraulik, sowohl für Strömungen als auch für Sedimenttransport. Damit lässt sich die Ähnlichkeit (oder Unähnlichkeit) von Systemen, hier also: Strömungen mit Sedimenttransport, quantitativ beschreiben.

Im ersten Schritt müssen die für einen physikalischen Prozess relevanten Parameter identifiziert werden. Ferguson et al. (2002) gehen davon aus, dass sich die Partikelgeschwindigkeit V_t als Funktion von fünf Variablen beschreiben lässt:

$$V_t = f(\tau; \rho_S; g; D_t; D_b) \tag{5.5}$$

mit der Sohlschubspannung τ [N/m^2], der Korndichte ρ_S [kg/m^3], für die meist $\rho_S \sim 2650$ kg/m^3 gesetzt wird, die hier aber (im Prinzip) als Variable behandelt wird, der Erdbeschleunigung $g = 9{,}81$ [m/s^2], dem Korndurchmesser des betrachteten (Tracer-)Steines D_t [m] und dem mittleren Korndurchmesser des Bettmaterials (bzw. Geschiebes) D_b [m].

Es gibt also k=6 relevante Parameter; über die Dimensionsanalyse lässt sich das also auf $k-n=3$ dimensionslose Größen (eine davon abhängig, zwei unabhängig) reduzieren (Ferguson et al., 2002):

$$V_* = f(\tau_*; D_*) \tag{5.6}$$

mit einer dimensionslosen Partikelgeschwindigkeit V_*, die sich über alle Phasen erstreckt, also auch auf jene Phasen, während der die Körner verschüttet sind (virtuelle Geschwindigkeit, vgl. auch Pkt. 5.3)

$$V_* = V_t / \sqrt{g D_t} \tag{5.7}$$

der dimensionslosen Sohlschubspannung τ_* (Shields-Zahl)

$$\tau_* = \tau / g(\rho_S - \rho)\, D_b \tag{5.8}$$

ρ [kg/m^3] ist die Dichte des Fluids (Wasser; $\rho \sim 1000$ kg/m^3),

und einem dimensionslosen Korndurchmesser[49] D_*

$$D_* = D_t / D_b \tag{5.9}$$

Die Shields-Zahl τ_* ist ein Maß für die Strömungsintensität; genauer formuliert: sie beschreibt das Verhältnis zwischen den auf das Korn wirkenden Strömungskräften und dem Eigengewicht des Kornes

---

47 Buckingham, E. (1914). On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations. Physical review, 4(4), 345.

48 Munson, B. R., Young, D. F., & Okiishi, T. H. (1998): Fundamentals of Fluid Mechanics.

49 Dieser dimensionslose Durchmesser hat Ähnlichkeiten mit dem unter Kap. 4.1 genannten dimensionslosen Parameter nach Lisle (1995), beschreibt hier aber ganz andere Prozesse. Beides steht in keinem inhaltlichen Zusammenhang.

unter Auftrieb. Das ist die für den Geschiebetransport primär relevante Variable[50].

Auf dieser Grundlage und durch Anpassung ihrer Daten (Multiregressionsanalyse) finden Ferguson et al. (2002) schließlich:

$$V_* = 0{,}0075(\tau_*)^{0{,}85} exp(-1{,}25 D_*) \tag{5.10}$$

Diese Beziehung wird, ausgewertet für drei Shields-Zahlen ($\tau_* = 0{,}05; 0{,}075; 0{,}10$) in Abbildung 20 gemeinsam mit den Daten für die Donau (Liedermann et al., 2012) und den Oberrhein (Gölz, 2002) geplottet, wobei D_t variiert wird (immer mit $D_b \sim 25$ mm).

Der Koeffizient 0,0075 in Gl. (5.10) hängt wahrscheinlich sehr stark vom hydrologischen Regime (vor allem die Häufigkeit und Dauer von Hochwässern) ab, während die anderen Parameter (Exponent über τ_*; Faktor zu D_*) als universelle Größen verstanden werden können (Ferguson et al., 2002).

Dieser Ansatz beinhaltet eine Reihe von Idealisierungen; im Besonderen wird die große Bandbreite an Abflüssen (bzw. der dadurch bedingten und grundsätzlich instationären Strömungsintensitäten) auf einen einzigen repräsentativen Zustand (auch: bettbildender Abfluss) reduziert, und dafür wird nach Ferguson et al. (2002) der bordvolle Zustand (bzw. die dabei herrschende Sohlschubspannung) gesetzt, was letztlich dem Konzept von Wolman & Miller (1960)[51] folgt.

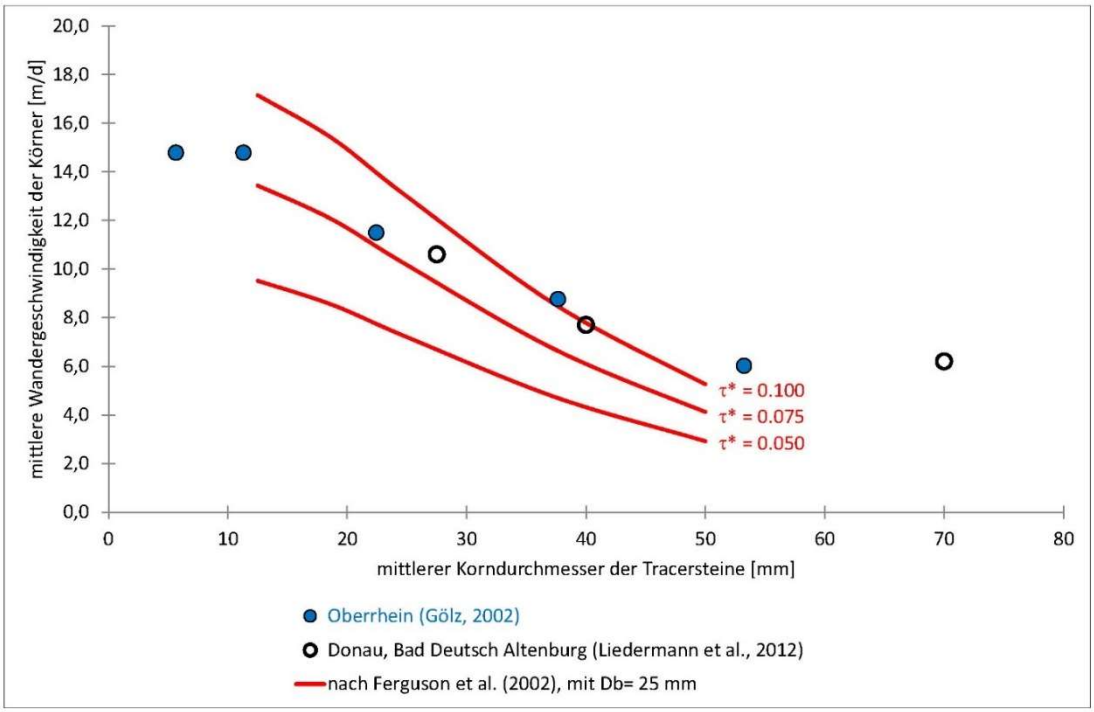


Abbildung 20: Abhängigkeit der langfristig mittleren Transportgeschwindigkeit vom Korndurchmesser, durch Messung ermittelte Werte für Donau östlich von Wien (Liedermann et al., 2012) und Oberrhein flussab von Iffezheim (Gölz, 2002) gemeinsam mit rechnerischen Ergebnissen nach Ferguson et al. (2002) für verschiedene Shields-Zahlen ($\tau_* = 0{,}05; 0{,}075; 0{,}10$)

50 Die Shields-Zahl wird in vielen Geschiebetransportfunktionen (z.B. auch in der Meyer-Peter und Müller-Formel) und in anderen sedimenthydraulischen Berechnungen als unabhängige Variable, die die Strömungsintensität beschreibt, angesetzt.

51 Wolman, M. G., & Miller, J. P. (1960). Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. The Journal of Geology, 68(1), 54-74.

5.5 Berücksichtigung weiterer Daten, dimensionslose Darstellung

In Abbildung 19 und Abbildung 20 wurden die Daten für Donau (östlich von Wien) und Oberrhein (flussab von Iffezheim) in dimensionsbehaftetet Form direkt gegenübergestellt. Das ist nur sinnvoll möglich, weil die hydraulischen und granulometrischen Verhältnisse in Donau und Oberrhein sehr ähnlich sind, vgl. auch Anhang A. Würde man Ergebnisse von Tracer-Versuchen aus ganz anderen Flussabschnitten vergleichen wollen, etwa mit der Elbe bei Prettin (km 175), wo ebenfalls Versuche mit petrographischen Tracern (ca. 20.000 t Meißner Granit; 1997/2001; vgl. Faulhaber et al., 2001)[52] durchgeführt wurden, dort mit $D_b \sim 12{,}5$ mm (Gabriel et al., 2009; graphisch aus einer Abbildung herausgelesen)[53], dann wäre der direkte Vergleich unzulässig, man müsste dann auf eine dimensionslose Beschreibung (V_* versus D_*) wechseln.

Dieser Schritt wird in Abbildung 21 vollzogen:

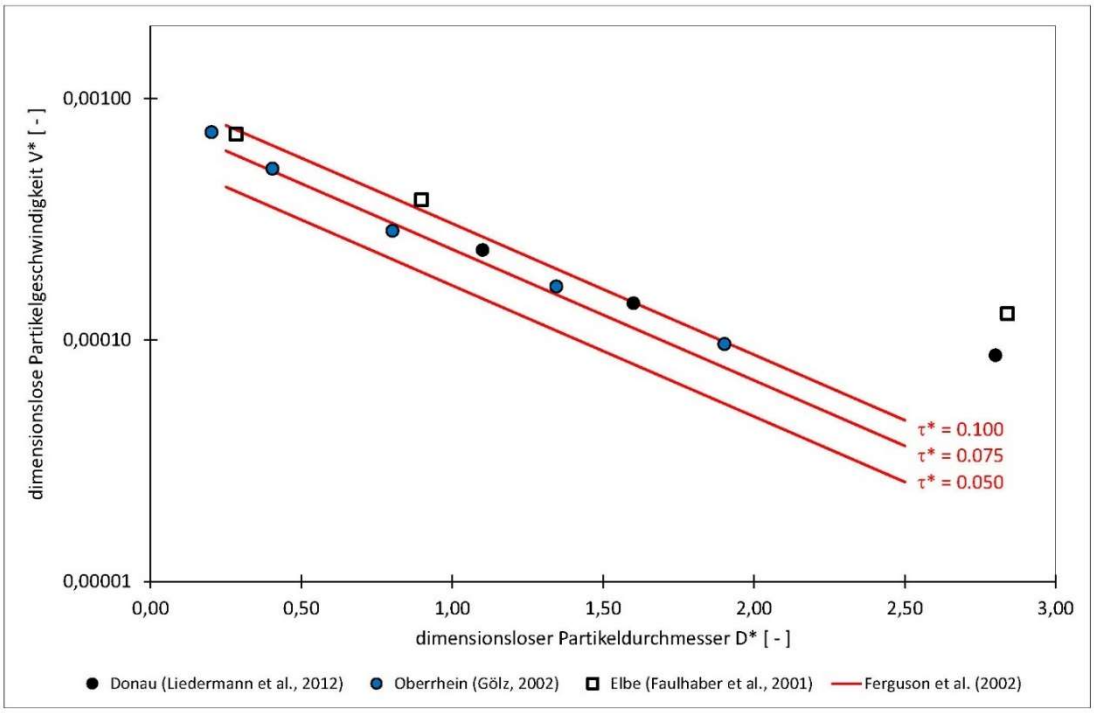


Abbildung 21: Gegenüberstellung der Tracer-Versuche in Donau östlich von Wien (Liedermann et al., 2012), Oberrhein flussab von Iffezheim (Gölz, 2002) und Elbe bei Prettin (Faulhaber et al., 2001) in dimensionsloser Darstellung

Die Werte nach Ferguson et al. (2002) passen für D_* bis etwa 1,8 ziemlich gut zu den Messwerten aller drei Flüsse, zumindest hinsichtlich der Neigung. Der Koeffizient müsste, wenn man berücksichtigt, dass τ_* im bordvollen Zustand eher bei 0,05 als bei 0,10 liegt, angehoben werden, was zu einem modifizierten Modell führen würde.

---

52 Faulhaber, P.; Gabriel, T.; Gölz, E.; Kühne, E.; Riehl, K.; Schoßig, R. (2001): Erosionsstrecke der Elbe. Ergebnisse der Naturversuche zur Geschiebezugabe 1996 – 1999. Wasser- und Schifffahrtsdirektion Ost; Wasser- und Schifffahrtsamt Dresden; Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz; Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.

53 Gabriel, T., Kühne, E., Klos, S., Anlauf, A., Gölz, E., & Faulhaber, P. (2009). Das Sohlstabilisierungskonzept für die Elbe von Mühlberg bis zur Saalemündung. *Wasserbauliche Mitteilungen*, (40 S 105), 114.

5.6 Mittlere Partikelgeschwindigkeit und aktiver Layer

Kennt man die langfristig mittlere Geschiebe-Transportrate GT [m³/a], die mittlere Transportgeschwindigkeit V_t [m/a] und die mittlere geschiebeaktive Breite B_{GT} [m], dann kann daraus eine mittlere Mächtigkeit Δz_{GT} der geschiebeaktiven Schichte (active layer thickness) abgeschätzt werden, denn mit der Definitionsgleichung

$$V_t B_{GT} \Delta z_{GT} = GT \tag{5.11}$$

folgt

$$\Delta z_{GT} = GT/(V_t B_{GT}) \tag{5.12}$$

Für das Geschiebe in dieser Strecke kann (unter Berücksichtigung von Liedermann et al., 2012) etwa $V_t \sim 4000$ m/a (~ 11 m/d) und für B_{GT} ca. 200 bis 250 m (eigene Schätzung) gesetzt werden; die Geschiebetransportrate (volumetrisch) liegt bei Bad Deutsch Altenburg im Bereich zwischen 200.000 und 250.000 m³/a (sh. Kap. 3); damit erhält man für Δz_{GT} in der Größenordnung:

$$0{,}20\ m \leq \Delta z_{GT} \leq 0{,}25\ m \tag{5.13}$$

Das ist mit der Vorstellung eines Geschiebetransportes mit ebenem Bett (plane bed transport) kaum in Einklang zu bringen, wohl aber mit Kiesdünen, deren Auftreten ja mit Flächenecholotaufnahmen nachgewiesen werden können und die offensichtlich den primären Transportmechanismus (eventuell mit Ausnahme von Niederwasser) bilden, vgl. Abbildung 22, Abbildung 23 und u.a. Gmeiner et al. (2016)[54].

[54] Gmeiner, P., Liedermann, M., Haimann, M., Tritthart, M., & Habersack, H. (2016). Grundlegende Prozesse betreffend Hydraulik, Sedimenttransport und Flussmorphologie an der Donau. Österreichische Wasser-und Abfallwirtschaft, 68(5), 208-216.

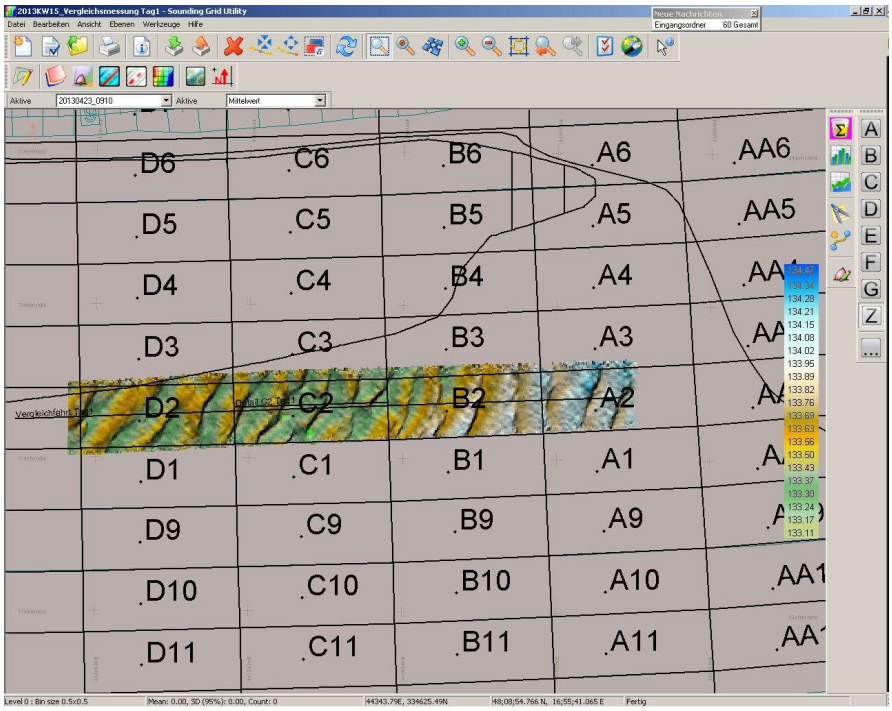


Abbildung 22: Flächenecholotaufnahme vom 23.04.2013 bei Bad Deutsch Altenburg (Naturversuch); Bereiche D2/C2/B2/A2, Strom-km ca. 1884,9 bis 1884,7, ca. 80 bis 100 m vom linken Ufer entfernt. Man erkennt die wellige, dünenartige Sohlstruktur. Quelle: Nicola – Engineering.

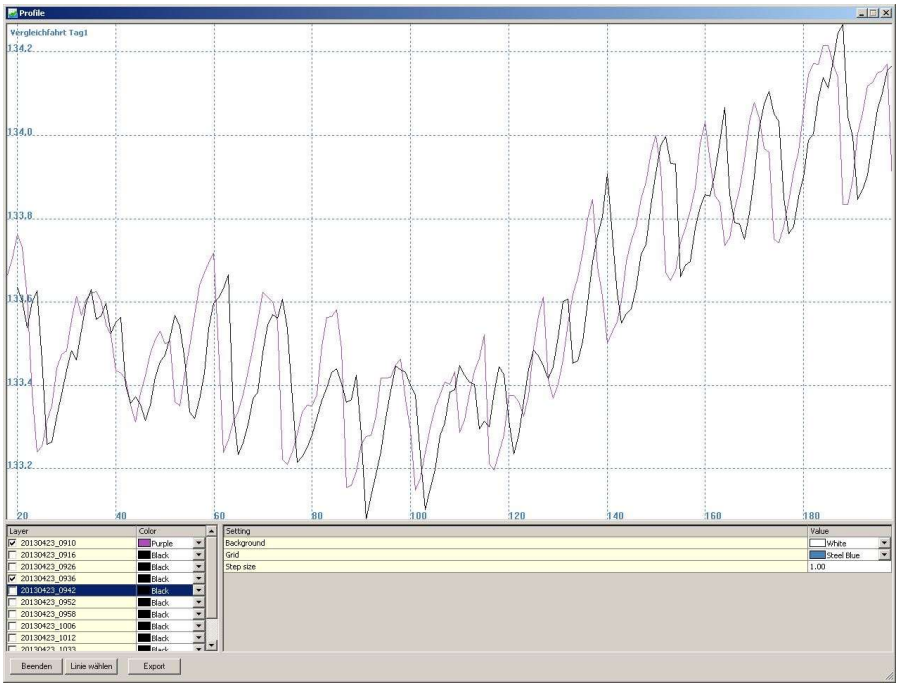


Abbildung 23: Längenschnitt, bei Bad Deutsch Altenburg (Naturversuch; vgl. auch Abbildung 22, entlang der Mittellinie der Bereiche D2/C2/B2/A2, vom 23.04.2013). Der Vergleich zweier Flächenecholotaufnahmen, die mit geringem zeitlichem Abstand (09:10 gegen 09:36) durchgeführt wurden zeigt, wie diese Kiesdünen in Strömungsrichtung wandern; durch den Vergleich der Wellentäler bzw. Wellenkämme (Verschiebung um rd. 2,6 m) kann man in diesem Fall eine Wandergeschwindigkeit von rd. 6 m/h abschätzen. Die durchschnittliche Dünenhöhe liegt bei rd. 30 cm; der Abfluss war zum Aufnahmezeitpunkt mit rd. 2.750 m^3/s deutlich über Mittelwasser. Quelle: Nicola – Engineering.

5.7 Mittlere Partikelgeschwindigkeit und Dünentransport

Findet der Geschiebetransport über Dünen, die sich translatorisch mit einer Transportgeschwindigkeit V_{TK} (der Index „TK“ steht hier für Transportkörper) in Fließrichtung bewegen und eine mittlere Dünenhöhe Δz_{TK} haben, statt, dann muss für die Geschiebetransportrate gelten:

$$GT \sim \frac{1}{2} B_{GT} \Delta z_{TK} V_{TK} \tag{5.14}$$

Der Beiwert $1/2$ berücksichtigt eine dreieckige Form (im Längenschnitt), im Sinn eines Völligkeitsgrades; mit leicht konkaver Form (zum Dünenscheitel hin flacher) könnte der Beiwert auch etwas höher sein, etwa $\sim 0{,}60$.

Die Geschwindigkeit der Kiesdünen in dieser Donaustrecke wird in Gmeiner et al. (2016) mit (Größenordnung) $V_{TK} \sim 2{,}5 \cdots 9$ m/h angegeben, und im Mittel mit $V_{TK} \sim 5{,}6$ m/h. Diese Werte haben sich aus der Beobachtung der Dünen bei Bad Deutsch Altenburg mittels Flächenecholotaufnahmen ergeben, vgl. auch Abbildung 22 und Abbildung 23.

Es liegt zunächst nahe, die mittlere Transportgeschwindigkeit (der Tracersteine bzw. Einzelkörner) V_t mit dieser (mittleren) Dünengeschwindigkeit gleichzusetzen, also

$$V_t \sim V_{TK} \tag{5.15}$$

aber das passt, bezogen auf mittlere Korndurchmesser, mit $V_t \sim 10{,}6/24 \sim 0{,}45$ m/h überhaupt nicht zusammen, die Dünen sind viel schneller als die Tracersteine (in der Größenordnung etwa 10-fach). Allerdings kann dieser Widerspruch leicht aufgelöst werden, wenn man berücksichtigt, dass die einzelnen Steine (bzw. Tracersteine) immer wieder – und offensichtlich für längere Phasen – im Sohlmaterial unter der aktiven Schichte (active layer) verschüttet sind.

Gölz (2002) berichtet für den Oberrhein, dass man in Freeze-Cores Tracersteine bis zu 1,3 m unter der Sohloberfläche gefunden hat, und er vermutet eine mittlere Einmischtiefe (mixing depth) von ca. 0,8 m; diesen relativ hohen Wert begründet er u.a. mit dem Dünentransport. Ferguson et al. (2002) berichtet, dass man am Allt Dubhaig Tracersteine bis in 0,55 m Tiefe gefunden hat, wobei mit der Methode (magnetische Tracer) besonders tief eingeschüttete Tracer gar nicht detektiert werden können; von den 1260 magnetischen Tracersteinen wurden letztlich nur rd. 64% wiedergefunden; auch in seitlichen Kiesbänken wurden Tracersteine zwischengelagert.

Auch mit dieser Abschätzung und diesen Beobachtungen wird die Bedeutung der Ruhephasen (zwischen den Bewegungsphasen) deutlich, und dass man für diese Fragestellung keinesfalls Geschwindigkeiten u_t für die eigentliche Bewegungsphase, wie sie etwa bei Van Rijn (1984) verwendet wird, setzen darf. Die tatsächlich relevante virtuelle Geschwindigkeit kann mittels Tracerversuchen ermittelt werden, wobei für die Abschätzung der Effizienz die Abhängigkeit $\varepsilon = \mathrm{f}(D)$ vom Korndurchmesser entscheidend ist. Und es kann, wie gezeigt, eine dimensionsanalytisch basierte Methode zum Vergleich von Daten aus verschiedenen Flüssen (bzw. Flussabschnitten) eingesetzt werden.

5.8 Anwendung der Beziehung für die virtuelle Geschwindigkeit auf die Effizienz

Wenn für den Effizienzfaktor gem. Gl. [5.2]

$$\varepsilon = \mathrm{f}(D) \propto \Delta t \propto V_t^{-1}$$

gilt, vgl. Kap. 5.2, und wenn die Effizienz auf den mittleren Korndurchmesser des Bettmaterials (also Ausgangszustand) normiert wird, derart, dass $\varepsilon = 1$ für $D_* = 1$ (also D_t=D_b), somit

$$\varepsilon = V_b / V_t \tag{5.16}$$

und wenn wir die von Ferguson et al. (2002) gefundene Beziehung [5.10] anwenden, dann gilt ceteris paribus (bei ansonsten gleichen Randbedingungen), wenn nur D_t (und damit D_*) variiert wird:

$$\varepsilon = \frac{0{,}0075(\tau_*)^{0{,}85} exp(-1{,}25 \cdot 1)\sqrt{g \cdot D_b}}{0{,}0075(\tau_*)^{0{,}85} exp(-1{,}25 D_*)\sqrt{g \cdot D_t}} = \frac{exp(-1{,}25 \cdot 1)}{exp(-1{,}25 D_*)} \sqrt{D_*^{-1}} \tag{5.17}$$

d.h. der Proportionalitätsfaktor 0,0075, die Shields-τ_* Zahl und die Erdbeschleunigung kürzen sich heraus, und wir erhalten eine nur von D_* abhängige Variable.

5.9 Zahlenbeispiele bzw. Sensitivitätsanalyse für die Donau östlich von Wien

Mit den unter Kap. 5.8 beschriebenen Überlegungen ist die Fragestellung im Prinzip gelöst und ein neues Bemessungskonzept (für Geschiebezugaben mit vom Bettmaterial abweichenden Kornverteilungen) formuliert. Wird beispielsweise Baggermaterial aus dem stromab untersten Bereich der Strecke mit $D_t = 20\ mm$ (und $D_b = 25\ mm$) verwendet, dann wird mit $D_* = 0{,}8$:

$$\varepsilon = \frac{exp(-1{,}25 \cdot 1)}{exp(-1{,}25 D_*)} \sqrt{D_*^{-1}} = \frac{exp(-1{,}25 \cdot 1)}{exp(-1{,}25 \cdot 0{,}8)} \sqrt{1{,}25} = 0{,}87 \tag{5.18a}$$

Und umgekehrt, wenn gröberes Kiesmaterial mit $D_t = 50\ mm$ verwendet würde (Sohlvergröberung), dann wäre $D_* = 2{,}0$ und:

$$\varepsilon = \frac{exp(-1{,}25 \cdot 1)}{exp(-1{,}25 D_*)} \sqrt{D_*^{-1}} = \frac{exp(-1{,}25 \cdot 1)}{exp(-1{,}25 \cdot 2{,}0)} \sqrt{0{,}5} = 2{,}47 \tag{5.18b}$$

In Tab. 5 werden weitere Werte (für Variationen von D_t und D_b) angegeben.

Tabelle 5: Effizienzfaktoren ε für verschiedene mittlere Korndurchmesser des Bettmaterials D_b (Zeilen) und Variation des Korndurchmessers des Zugabematerials D_t (Spalten)

		D_t [mm}] =												
		20	22,5	25	27,5	30	32,5	35	37,5	40	42,5	45	47,5	50
D_b= [mm]	22,5	0,92	**1,00**	1,09	1,19	1,31	1,45	1,61	1,78	1,98	2,21	2,47	2,76	3,09
	25,0	0,87	0,93	**1,00**	1,08	1,17	1,28	1,39	1,53	1,67	1,84	2,03	2,23	2,47
	27,5	0,83	0,88	0,94	**1,00**	1,07	1,15	1,25	1,35	1,46	1,59	1,73	1,89	2,06

5.10 Schwierigkeiten mit dem Ansatz

Abbildung 21 zeigt deutlich, dass die Abnahmen von V_* mit D_* im stärker grobkörnigen Bereich ($D_* > 1{,}8$) offensichtlich schwächer ausfällt als nach dem Ansatz von Ferguson et al. (2002) zu erwarten; zumindest zeigen das einzelne Daten für Elbe und Donau. Die Anwendung dieses Bemessungskonzeptes für höhere D_*-Zahlen scheint daher unsicher; möglicherweise ist eine andere Anpassung der Daten (eine Potenzfunktion?) zweckmäßig. Umgekehrt sollten die virtuellen Geschwindigkeiten für $D \geq D_{max}$ gegen null gehen, im Sinn eines Schwellenwertkonzepts; auch das wirft zusätzliche Fragen auf, die ggf. im Zuge einer späteren Bearbeitung behandelt werden können.

Anzumerken ist schließlich, dass alle Bemessungsansätze immer auch über eine Erfolgskontrolle bzw. ein Monitoringkonzept (primär über Wasserstände- bzw. Wasserspiegel gestützt) abgesichert werden müssen; dies führt zum Kap. 6.

6 Zur Verbesserung des Monitorings

Eine optimierte Geschiebebewirtschaftung kann nicht einfach in endgültiger Form ingenieurmäßig geplant und implementiert werden, so, wie das bei Bauwerken geschieht. Am Oberrhein (flussab der Staustufe Iffezheim) waren, ausgehend von frühen Konzepten (Felkel, 1970, 1980)[55] verschiedene Anpassungen erforderlich (Kuhl, 1993; Stenglein, 2002)[56], und ganz allgemein wird beim Thema des Sedimentmanagements nach dem Prinzip von „Versuch und Irrtum“ vorzugehen sein. Das ist auch in diesem Flussabschnitt der Fall, wo seit 1996/97 aufgrund wasserrechtlicher Vorgaben Maßnahmen zur UW-Sicherung des Kraftwerkes Freudenau gesetzt werden (Schimpf et al., 2009)[57], und es ist mittlerweile unbestritten, dass dabei – auch unter den zunächst eher bescheidenen Zielsetzungen (Verhinderung von Verschlechterungen gegenüber dem Zustand ohne KW Freudenau) – einige Nachbesserungen bzw. Korrekturen erforderlich sind (BMNT, 2018; Klasz & Baumgartner, 2024; Klasz, 2025).

In einer früheren Studie (Klasz, 2014) wurde zum Zweck der Optimierung der Geschiebebewirtschaftung in dieser Strecke eine adaptive Vorgangsweise vorgeschlagen und grob skizziert. Dies wird hier weiter detailliert.

6.1 Allgemeine Anforderungen an die Daten und Informationen

Neben den üblichen Anforderungen (Genauigkeit und Zuverlässigkeit; Konsistenz …) sollen die Daten und Informationen:

a.) für die Problemstellung relevant sein,

b.) robust sein,

c.) eine adaptive Vorgangsweise unterstützen;

---

55 Felkel, K. (1980): Die Geschiebezugabe als flussbauliche Lösung des Erosionsproblems des Oberrheins. Mitteilungsblatt der BAW, 1980, H. 47; 54 Seiten.

56 Stenglein, J. (2002): Unterhaltungskonzept für den freifließenden Rhein. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 84; S 187 – 204.

57 Schimpf, H., Harreiter, H., Ziss, H. (2009): Zehn Jahre Erfahrungen mit der Unterwassersicherung zum Kraftwerk Freudenau; Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift (ÖIAZ) 154, Heft 1-6/2009.

ad (a.):

Ein zielgerichtetes Geschiebemanagement sollte sich auf die für die Fragestellung relevanten Daten und Informationen stützen und die Schaffung unübersichtlicher Datenfriedhöfe vermeiden: „Blick auf das Wesentliche“. Dies kann durch Prioritätensetzungen unterstützt werden.

ad (b.):

Daten und Informationen sollen selbst unter den üblichen Störeinflüssen (z.B. Messfehler, idealisierende Rechenannahmen, Störeinflüsse durch hydrologische Schwankungen …) verläßliche Aussagen liefern bzw. möglichst wenig durch solche Störeinflüsse beeinflusst werden. Beispielsweise kann die Sohlstabilität (bzw. die Erfolgskontrolle der Geschiebebewirtschaftung) auf Basis des zeitlichen Vergleiches kennzeichnender NW- oder MW-Spiegellagen (für einen bestimmten Referenzabfluss, vgl. Klasz, 2025) hinreichend verläßlich dokumentiert werden; weiter führende Informationen liefert der zeitliche Vergleich von Stromsohlaufnahmen und die daraus ermittelten angenäherten[58] Sohlspeicheränderungen. Darüber hinaus gehende und aufwendigere Methoden (wie etwa Geschiebemessungen, Tracerversuche oder Freeze-Cores) sind für eine primäre Erfolgskontrolle nicht erforderlich, sie können aber für spezielle Fragen hilfreich werden (vgl. auch Kap. 3 und Kap. 5) oder auch für wissenschaftliche Untersuchungen.

6.2 Zum Konzept einer adaptiven Vorgangsweise

Unter schwierigen und nur unter Unsicherheiten abschätzbaren Randbedingungen und allgemein für umweltrelevante Projekte wird der Einsatz bzw. die Entwicklung einer adaptiven Vorgangsweise („adaptives Management“) empfohlen, vgl. u.a. Linkov et al. (2006). Dies war auch beim FGP[59] (speziell auch bei der Kritik von außen) ein wichtiger Aspekt; allerdings blieben die Vorschläge und die Diskussion dazu bemerkenswert diffus („vom Fluss lernen“) und unverbindlich.

Man geht dabei davon aus, dass natürliche Systeme nur mit größeren Unsicherheiten verstanden werden und versucht, diese Unsicherheiten dadurch zu minimieren, dass man über das System nicht nur vor den Eingriffen – also in der Planungsphase – Daten und Informationen sammelt, Modelle entwickelt und lernt, sondern eben auch durch die Eingriffe und ihre Wirkungen selbst („learning by doing“), wodurch eine Rückkopplung entsteht, und dadurch werden laufende Anpassungen der eingesetzten Strategien auf Grundlage der gesammelten Erfahrungen möglich. Es handelt sich um einen grundsätzlich kybernetischen bzw. – nach heutiger Terminologie – systemtheoretisch begründeten Ansatz (Klasz, 2014).

Abbildung 24 (aus Linkov et al., 2006) zeigt die Unterschiede zwischen (a.) einer traditionellen Vorgangsweise, (b.) „passiven“ Formen des adaptiven Managements und einem (c.) „aktiven“ adaptiven Management.

Beim traditionellen Ansatz gibt es zwar den Schritt der Überprüfung (Evaluierung) der Zielerfüllung, aber Rückkopplungen werden nur dann gesetzt, wenn eine gewählte Vorgangsweise grundlegend oder in einem nicht mehr zu akzeptierenden Ausmaß gescheitert ist. Solange dies nicht eintritt oder noch nicht erkannt wurde, bleibt die Vorgangsweise linear, also ohne Rückkopplung. Im vorliegenden Fall sind die wasserrechtlich vorgegebene UW-Sicherung der VHP bis 2018 (einschließlich aller Begleitmaßnahmen) und auch die Geschieberückführungen der viadonau diesem Ansatz zuzuordnen.

---

58 „Angenähert“ bereits wegen des Problems der unzureichenden Aufnahmebreiten, sh. Kap. 6.3.

59 „FGP“ steht für „Flussbauliches Gesamtprojekt“.

Wird eine handlungsrelevante Rückkopplung zwischen der Evaluierung und dem Konzept für die Vorgangsweise (management strategy) hergestellt, und werden damit Strategie, Modelle und Maßnahmen auf Basis der gesammelten Erfahrungen angepasst, dann verfolgt man bereits einen adaptiven Ansatz, der aber (iSv. Linkov et al., 2006) noch „passiv" bleibt. In der Phase ab 2018 (mit der Arbeitsgruppe im Ministerium, und den §21a-WRG-Bescheiden 2019 und voraussichtlich aktuell) ist die Geschiebebewirtschaftung in diese Stufe gekommen.

In der zuletzt bei Linkov et al. (2006) genannten Form, also bei einem „aktiven" adaptiven Ansatz, werden gleichzeitig mehrere Alternativen getestet bzw. durchgespielt. Damit wird die Bandbreite der Möglichkeiten vergrößert und damit ein verbessertes Potential für Optimierungen angestrebt (Klasz, 2014).

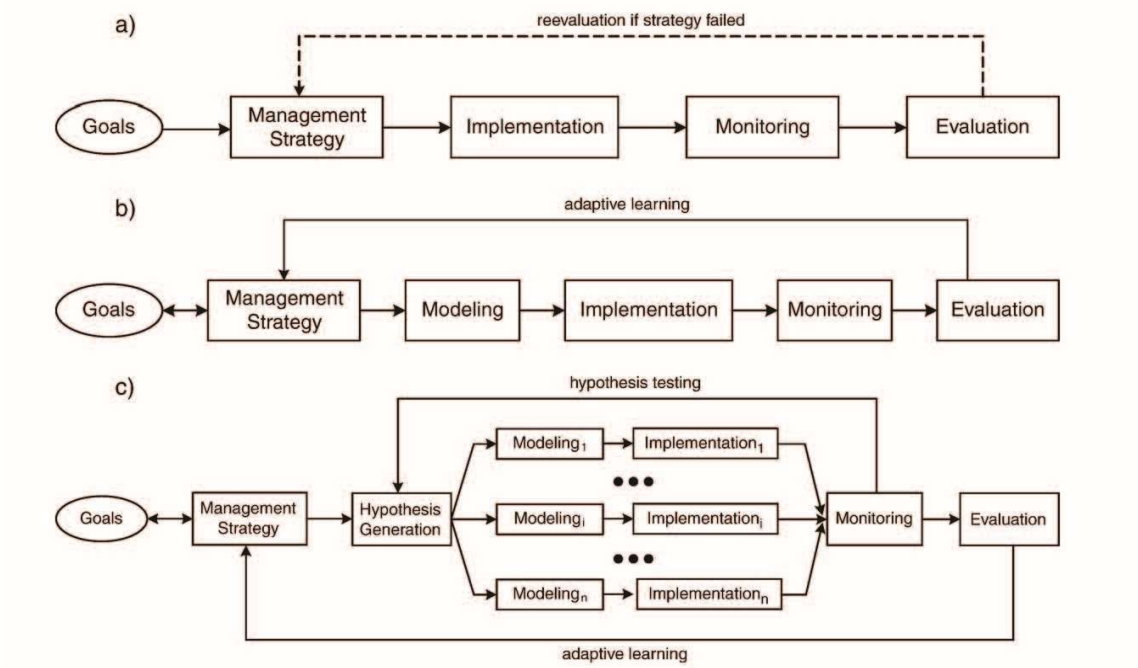


Abbildung 24: Unterschiede zwischen (a) traditionellem Management, (b) passivem adaptiven Management und (c) aktivem adaptiven Management; übernommen aus Linkov et al. (2006)

Das Prinzip betrifft somit alle Ebenen (bzw. Phasen) der Geschiebebewirtschaftung bzw. zugehöriger Projekte und Maßnahmen, also

- die Entwicklung grundsätzlicher Strategien (management strategy),
- die Entwicklung von Modellen und Werkzeugen zum Verständnis und zur Planung (modeling),
- die damit gesetzten baulichen oder sonstigen Maßnahmen (implementation),
- Monitoring und Erfolgskontrolle (monitoring, evaluation);

Man könnte den adaptiven Ansatz noch weiter fassen, wenn man schließlich auch die Ziele (goals) adaptieren würde; diesbezüglich spielt auch eine Rolle, ob man die Ziele noch sehr allgemein definiert oder bereits quantitativ fassbar und detailliert definiert (objectives). Dieser Aspekt (einer adaptiven

Zielanpassung) wird im Folgenden nicht weiter verfolgt, derzeit stehen noch die Strategien und Maßnahmen im Vordergrund[60].

Diese Gedanken sind nicht neu oder orginell, weder für das menschliche Handeln im Allgemeinen noch im Besonderen für den Wasserbau. Der „klassische" Flussbau hat ohnehin immer nach dem Prinzip „Versuch und Irrtum" funktioniert, zumal sich die betroffenen Systeme (Flüsse und Flusslandschaften) häufig einer einfachen Berechenbar- und Planbarkeit entzogen haben (Klasz, 2014). Allerdings wurde dies im Allgemeinen nicht speziell thematisiert, sondern eher verschwiegen. „Versuch und Irrtum" beinhaltet eben auch die Irrtümer; und diese werden selten proaktiv diskutiert, auch in der wissenschaftlichen Literatur ist das selten, und bei verwaltungsrechtlich geregelten und kostenintensiven Maßnahmen stellen sich auch Fragen nach der Haftung oder sonstigen rechtlichen Folgen. Es gibt aber auch technische Bereiche, in denen eine offene Vorgangsweise üblich ist; speziell in der Flugsicherheit, wo Unfälle und Störfälle systematisch und mit Blick auf Verbesserungen untersucht werden, was die Zivilluftfahrt sehr sicher gemacht hat.

Verschiedene Elemente des Verwaltungsrechtes können eine solche adaptive Vorgangsweise durchaus unterstützen, speziell die Bestimmungen gem. §21a-WRG (Abänderung von Bewilligungen), wo ja nicht die Suche nach Schuldigen relevant ist, sondern die Sicherstellung des „öffentlichen Interesses" (iSv. §105 WRG) und die nachträgliche Anpassung von wasserrechtlich genehmigten Maßnahmen.

Eine wesentliche Schwierigkeit für diese Vorgangsweise liegt in der Eigendynamik des Systems, also im vorliegenden Fall in der Langsamkeit, mit der der Fluss reagiert (mst. Jahre bis Jahrzehnte); große Flüsse folgen anderen zeitlichen Skalen als die Verwaltung und das Management; das betrifft im Übrigen auch die Finanzierung von Maßnahmen.

Von zentraler Bedeutung für jedes adaptive Management sind Monitoring und Erfolgskontrolle (Evaluierung). In Klasz (2014) wurden für eine optimierte Geschiebebewirtschaftung die folgenden, in Tab. 6 genannten Steuergrößen und Einflussgrößen als wesentlich identifiziert.

[60] Aus naturschutzfachlicher Sicht besteht neben dem kurzfristigen und aktuell relevanten Ziel der Stabilisierung der mittleren Sohllage auch das längerfristige Ziel der Wiederanhebung der Wasserspiegel, was ebenfalls auf adaptive Ziel- und Strategieanpassungen hinauslaufen muss.

Tabelle 6: Monitoring und Erfolgskontrolle für eine optimierte Geschiebebewirtschaftung; aus Klasz (2014) übernommen, modifiziert

Fragestellung / Aspekt:	**Methode:**	**Anm.:**
Stabilität der Sohle; mittel- bis längerfristig: Wiederanhebung der Wasserspiegel (Erfolgskontrolle)	charakteristische Wasserstände an Pegeln und ggf. Wasserspiegel-Fixierungen (für charakteristische Abflüsse) und deren zeitlicher Vergleich	wird bereits durchgeführt (Hydrographischer Dienst bzw. via donau); zeitlich aber zu verdichten (möglichst jährlich), ggf. Verdichtung des Pegelnetzes;
bzw.: Nachsteuern der Zugabemengen	Stromgrundaufnahmen in bestimmten Zeitabständen (halbjährlich und nach stärkeren HW) und Ermittlung der Differenz-Kubaturen (Auflandungs-/ Eintiefungs-Kubaturen) im Längsverlauf	wird ohnehin bereits durchgeführt (via donau), Methodik vorhanden und bewährt;
Festlegen der Zugabebereiche		primäre Zugabebereiche: VHP-Erhaltungsstrecke und langgestreckte Kolke; darüber hinausgehend: identifizierte Erosionszonen
Festlegen der Zugabe-Kornverteilungen (Berücksichtigung / Ausgleich des Verkleinerungs- bzw. Abriebverlustes bei Geschieberückführungen)	Sohlproben in den Zugabebereichen und Baggerbereichen (bzw. Kiesquellen), Vergleich der Kornverteilungen aus Zugabe- und Baggerbereichen	Methodik vorhanden und bewährt; praktische Abwicklung (Entnahme, Siebung, Auswertung) wäre noch zu optimieren; Entnahmen primär mit Greifer, in Einzelfällen Freeze-Cores
Eignung des Zugabematerials aus petrographischer / chemischer / hygienischer Sicht	petrographische und chemische Untersuchungen	Methodik vorhanden und bewährt; primär bei den „von außen“ abgelieferten Zugaben relevant
Sohlvergröberung, event. auch Verwendung von Kantkorn: Wirkungsgrad (Abnahme der Transportintensität)[61], ggf. auch damit zusammenhängende Aspekte wie z.B. Einmischtiefe	Tracerversuche, vorzugsweise radio-telemetrisch (event. auch petrographisch)	radio-telemetrisch verfolgte Tracer mittlerweile eine bewährte Methodik (Monitoring der BOKU zum Naturversuch Bad Dt. Altenburg, vgl. Liedermann et al., 2012a, 2012b)

Die auf Stromsohlvermessungen gestützte Methode wird im Folgenden auch mit „flussgeometrisch / vermessungstechnische Methode“ und die auf Pegelbeobachtungen (Wasserstände / Abflüsse) und charakteristische Wasserstände gestützte Methode als „hydrographische Methode“ bezeichnet.

6.3 Das Problem der unzureichenden Stromsohlvermessungen

Dieses Unterkapitel folgt im Wesentlichen dem achten Kapitel der Studie Klasz (2025).

Bereits von Anfang an wurden die Geschiebeausträge aus der VHP-Erhaltungsstrecke (Strom-km 1921 bis 1910) unterschätzt. Dort hätten aufgrund der Zielsetzungen des wasserrechtlichen

[61] Immer unter Aufrechterhaltung einer dynamischen Rundkornsohle, wie sie den natürlichen Verhältnissen entspricht. Kantkorn (speziell aus gebrochenen Wasserbausteinen aus Uferrückbau oder Vernetzungsprojekten) wäre nur im Sinn von Beimischungen zu verstehen.

Genehmigungsbescheides (BMLF, 1991)[62] überhaupt keine Sohlerosion geschehen dürfen; tatsächlich war (zwischen 1996 und 2018) ein Geschiebedefizit von zumindest 45.000 m^3/a gegeben (BMNT, 2018).

Diese Fehleinschätzung beruht darauf, dass Messboote nur dort die Stromsohle aufnehmen können, wo (zum Aufnahmezeitpunkt) ausreichend Wassertiefe vorliegt. Damit bleiben alle seichten Bereiche und Randzonen unberücksichtigt. Die mittlere VHP-Aufnahmebreiten lagen bei rd. 200 m, während die davon unabhängigen viadonau-Stromsohlaufnahmen rd. 240 m abgedeckt haben (BMNT, 2018); auf diesem Weg, also mit breiteren Aufnahmen, konnte der oben genannte Fehlbetrag (von ca. 45.000 m^3/a) ja erst nachgewiesen werden.

Entscheidend ist aber, dass selbst die größeren Aufnahmebreiten der viadonau nicht die gesamte relevante Flusssohle abdecken können. Dieser Donauabschnitt ist bei Mittelwasser rund 270 m breit, und bei höheren Wasserführungen noch breiter (bordvoll gegen ca. 350 m). Es ist davon auszugehen, dass in den Randzonen ebenfalls Geschiebe ausgetragen wurde und immer noch ausgetragen wird. Somit wären die 45.000 m^3/a für den Zeitraum 1996/2018 (und die VHP-Erhaltungsstrecke) nur eine Untergrenze, in der Studie Klasz (2025) wird rechnerisch (über die dortigen MW-Absenkungen) abgeschätzt, dass ein langjährig mittleres Geschiebedefizit von ca. 60.000 m^3/a für diesen Zeitraum eher wahrscheinlich ist, und unter dieser Voraussetzung wäre bzw. ist auch heute noch ein kleineres Geschiebedefizit (rechnerisch dann etwa 15.000 m^3/a) wirksam, das aber in trockenen und daher weniger transportwirksamen Jahren (also auch in den Jahren zwischen 2018 und 2023) nicht in Erscheinung tritt; man könnte es als „latent“ bezeichnen.

Diese Schwierigkeiten gelten aber auch für die Aufnahmen der viadonau, auch wenn diese breitere Bereiche als die VHP abdecken, und somit auch für die Gesamtstrecke. Damit ist zu folgern, dass die Methode der Stromsohlvermessung (bzw. der daraus ermittelten Differenzvolumina) zur Erfolgskontrolle nicht ausreicht, Sohlerosionen in Randbereichen bleiben damit unerkannt! Daher ist es erforderlich, eine Alternative zu implementieren, und diese besteht in der Beobachtung (Ermittlung) und dem Vergleich der Wasserstände (bzw. Wasserspiegel) für charakteristische Abflüsse (speziell: MQ und RNQ), wie in der Studie Klasz (2025) angewandt bzw. gezeigt.

6.4 Relevanz, Vorteile und Nachteile der hydrographisch gestützten Methoden

Es sollen hier nicht die zwei wichtigsten Methoden, also die flussgeometrisch-vermessungstechnische und die hydrographische als gegensätzlich dargestellt und gegeneinander ausgespielt werden. Beide Methoden haben ihre Anwendungen, und beide Methoden stützen sich gegenseitig. Allerdings wurde in den letzten rund dreißig Jahren praktisch nur die flussgeometrisch-vermessungstechnische Methode als handlungsrelevant angewandt, mit den unter Kap. 6.3 diskutierten Grenzen und Schwierigkeiten, und die andere, hydrographische Methode mit ihren Möglichkeiten weitgehend übersehen und vernachlässigt.

Folgende Argumente für eine viel stärkere Nutzung der hydrographischen Methode sind primär zu nennen:

[62] Donaukraftwerk Freudenau – Wasserrechtliche Grundsatzgenehmigung. Bescheid Zl. 14.570/182-I 4/91 vom 31.07.1991. Bundesministerium f. Land- und Forstwirtschaft.

(1) Unmittelbare Relevanz: Die meisten ökologischen bzw. wasserwirtschaftlichen Wirkungen (von Sohleintiefungen oder ggf. auch Auflandungen) hängen von Wasserständen bzw. Wasserspiegeln ab, und nicht von den (mittleren) Sohllagen in der Donau; dies gilt z.B. für die Dotation (Mengen und Häufigkeiten) von Seitenarmen, für die Beeinflussung der flussbegleitenden GW-Stände und die damit verbundenen (vegetations-)ökologischen Randbedingungen (Flurabstände und Überflutungshäufigkeiten);

(2) Vermeidung der weiter oben genannten Schwierigkeiten: Die Stromsohlvermessungen decken die seichten Bereiche (Randzonen) der Flusssohle nicht ab, während die Wasserstände bzw. Wasserspiegel von allen Sohländerungen (im benetzten Bereich) beeinflusst werden und dortige Änderungen widerspiegeln;

(3) Robustheit: Die Pegelstände bzw. Wasserspiegel werden kaum durch kleinräumige Sohlerosionen oder Auflandungen beeinflusst, sondern durch generelle und größere Veränderungen der Stromsohle; die Messungen bzw. Beobachtungen beruhen auf bewährten Methoden, Störeinflüsse können einfach ausgeschaltet bzw. Fehler einfach erkannt werden, die Auswertungen sind praxistauglich, ingenieurmäßig einfach und nach Plausibilität überprüfbar;

Dazu kommen noch weitere Vorteile in sozio-ökonomischer Hinsicht:

(4) Der ökonomische Aspekt: Die hydrographischen Daten (Pegelstände und Abflüsse) sind bereits verfügbar, zusätzliche Daten (speziell Wasserspiegel-Fixierungen, ggf. auch zusätzliche Pegelstellen) sind kostengünstig zu gewinnen; es geht hier also in erster Linie darum, solche Daten, die bereits vorliegen, zu nutzen, und weniger darum, zusätzliche Kosten zu verursachen; auch die Auswertungen sind relativ einfach und rasch möglich;

(5) Transparenz: Die hydrographischen Daten können sehr einfach und kostenfrei von interessierten Bürgern oder Institutionen über eHYD bezogen und genutzt werden. Im Gegensatz dazu sind Daten aus Stromsohlvermessungen nicht direkt verfügbar und auch nur mit sehr viel Aufwand und unter Verwendung spezieller Software (GIS-gestützt) auszuwerten; d.h. die flussgeometrisch-vermessungstechnische Methode unterliegt einem engen Wissensoligopol (hier: VHP und viadonau und sonst niemand), selbst die WR-Behörde hat nicht die personellen Ressourcen, solche Daten und Auswertungen im Detail nachzuvollziehen oder zu prüfen. In einem demokratischen Rechtsstaat wäre aber, gerade in umweltrelevanten Fragen, möglichst viel Transparenz zu fordern, und dies wird mit den hydrographischen Daten (und Methoden) gewährleistet.

Wichtig ist auch, dass mit der Beobachtung und Analyse der charakteristischen Wasserstände der Einfluss allfälliger hydrologischer Trends oder Fluktuationen ausgeschaltet wird, denn es werden ja immer die gleichen Bezugsabflüsse verwendet, sie liefern also rein morphologisch bedingte Veränderungen (Klasz, 2025).

Wasserspiegel (in einem Gerinne) werden nicht nur durch die (mittleren) Sohllagen bestimmt, sondern durch die gesamte Geometrie (also Breiten und Profilform), die Rauheiten (Flächen und Formreiheiten) und die Ausgangswasserstände im Unterwasser (untere Randbedingung). Wären diese Faktoren auch veränderlich, dann könnte ein fallender (oder steigender) Trend bei den charakteristischen Wasserständen noch nicht auf entsprechende Änderungen bei den (mittleren) Sohllagen zurückgeführt werden. Diese mehrfache Beeinflussbarkeit, eben auch durch andere geometrische und hydraulische Faktoren, kann in dieser Hinsicht als Nachteil verstanden werden. Allerdings gab und gibt es in dieser Strecke seit 1996 keine bzw. kaum nennenswerte Breiten- oder Geometrieänderungen, und wenn, dann beruhen sie auf Maßnahmen der viadonau (Renaturierung, im Besonderen Uferrückbau oder

größere Vernetzungsprojekte), dazu sind alle Informationen verfügbar und bekannt. Projektbedingte Änderungen von Wasserspiegeln werden üblicherweise bereits im Zuge der Planung rechnerisch ermittelt, das kann im Übrigen auch nachträglich berechnet und nachvollzogen werden, vor allem kann das auch empirisch (durch Wasserspiegelfixierungen vor und nach dem Bau) sehr genau untersucht bzw. überprüft werden. Man muss solche Änderungen, die selten eintreten und bereits vorher bekannt sind, letztlich nur bei der Interpretation der Wasserstands-Trendanalyse berücksichtigen.

Wichtig für die hydrographische Methode ist die zeitliche und räumliche Zusammenschau. Es gibt in dieser Strecke mehrere Pegelstellen (Tab. 7) mit langjährigen Beobachtungen (für die Pegel Fischamend und Hainburg sogar zurück bis 1846); es ist wichtig, diese Daten bzw. die Veränderungsraten im zeitlichen Verlauf und im Längenschnitt miteinander zu vergleichen. Dabei sollten dann auch die KWD-2020 und ggf. auch frühere KWDs (KWD-2010, KWD-1996, …) berücksichtigt werden.

6.5 Konkrete Fragestellungen im Zusammenhang mit den Geschieberückführungen

Die folgenden Überlegungen konzentrieren sich auf die Frage der Geschieberückführungen, wie das seit über einem Jahrzehnt von der viadonau betrieben wird und in den letzten Jahren weiter intensiviert wurde, und das dafür erforderliche Monitoring. Dabei stehen folgende Fragen im Vordergrund:

- Wo können / sollen Geschiebefänge eingerichtet bzw. betrieben werden?
- Wie sind die Geschiebefänge zu betreiben, speziell mit welchen (jährlichen) Entnahmemengen?
- Wie ist diese Maßnahme zu kontrollieren und zu steuern (nachträgliche Änderungen / Anpassungen)?
- Wie stark unterscheiden sich die Kornverteilungen (Sieblinien) an den Entnahmebereichen (Geschiebefängen) von den weiter flussauf (in den Zugabebereichen) natürlich zu erwartenden Verhältnissen (Einfluss der Kornverkleinerung in Längsrichtung, vgl. auch Kap. 4);

Für die Steuerung der Geschieberückführungen sind vor allem die vier Pegelstellen

a) Bad Deutsch Altenburg,

b) Hainburg,

c) Thebnerstraßl und

d) Wolfsthal

relevant. Durch den Betrieb von Geschiebefängen werden die Wasserspiegel flussauf[63] verändert (mutmaßlich gering), während die Sohle flussab davon durch die Geschiebeentnahmen beeinflusst wird. Es ist unvermeidbar, dass der Geschiebetransport dort lokal abnimmt (gegenüber dem Zustand ohne Geschiebefang), die Sohlerosion wird dort wieder verstärkt[64] bzw. in der österreichisch-slowakischen Grenze wird die Auflandungstendenz abgeschwächt und eventuell durch eine (schwache) Eintiefungstendenz abgelöst. All das wäre in den Zeitreihen der charakteristischen Wasserstände

[63] Unter der Voraussetzung einer unterkritischen Strömung, also mit Froude-Zahl <1 („Strömen“), was in der Donau generell (und bei allen Wasserführungen) der Fall ist.

[64] Wenn am Geschiebefang Material entnommen wird, dann wird der Fluss dazu tendieren, diesen Fehlbetrag flussab des Geschiebefanges durch Sohlerosion zu kompensieren.

($w(RNQ)$ und $w(MQ)$) gut erkennbar, wobei die Reaktionszeiten und die relativ geringen Änderungsraten eine längere Untersuchungsperiode (mehrere Jahre) erfordern, dies aber mit möglichst starker zeitlicher Auflösung (Jahreswerte).

In der statistischen Auswertung sollte dann eine reine Trendanalyse (lineare Regressionsanalyse; Sen-Slope und Mann-Kendall-Test) mit einem Bruchpunkttest (Chow-Test; Chow, 1960)[65] verbunden werden. Stärkere Änderungen (Trendbrüche), wenn deutlich zu viel Geschiebe entnommen wird, sollten bereits durch eine rein visuelle Überprüfung der Zeitreihen erkennbar sein. Dabei ist immer auch die bisherige Varianz an der jeweiligen Pegelstelle zu beachten[66], gerade die Zeitreihen der Pegel im unteren Teilabschnitt haben relativ wenig Streuung (glatte Verläufe, vgl. Abbildung 26 und Abbildung 27), was für das Erkennen von Trendwechsel günstig ist.

Bei der Interpretation sind natürlich alle allfälligen wasserbaulichen Eingriffe (Baggerungen, Umbau von Regulierungsbauwerken, Uferrückbauten usw.) zu berücksichtigen; speziell der Pegel Thebnerstraßl sollte durch stärkere Baggerungen beeinflusst werden, während der Pegel Wolfsthal deutlich ruhiger reagieren sollte.

Im Folgenden werden (aus der Studie Klasz, 2025) die Zeitreihen der charakteristischen Wasserstände für einige Pegel (Orth, Bad Deutsch Altenburg, Wolfsthal) und den Untersuchungszeitraum 1996/2023 (für Orth: 2003/2023) dargestellt. Insgesamt stehen in der Strecke zumindest[67] acht Pegelstellen zur Verfügung, vgl. Tab. 7 und Klasz (2025); gerade im unteren Teilabschnitt ist die Datenlage relativ günstig.

---

65 Chow, G. C. (1960). Tests of equality between sets of coefficients in two linear regressions. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 591-605.
Es handelt sich dabei um eine spezielle Form des F-Tests.

66 Auch der Chow-Test greift darauf zurück; präziser formuliert: auf die Residualquadratsummen zweier unterschiedlicher Regressionsmodelle, ohne Trendwechsel und mit Trendwechsel.

67 „Zumindest“, weil neben den über eHYD verfügbaren Pegel und dem von VHP betriebenen Kraftwerks-UW-Pegel noch zusätzlich ein Pegel bei der Donaukanalmündung besteht; zugehörige Daten (Tagesmittel) konnten zwischenzeitlich von viadonau bezogen werden.

Tabelle 7: Pegelstellen (Donau stromab des KW Freudenau) und zugehörige Informationen; PNP = Pegelnullpunkt; L= linksufrig; R= rechtsufrig; HJB = Hydrographische Jahrbücher

Pegel:	Lage [Str-km]		PNP [m ü.A.]	Zur Datenbasis:	Anm.:
Kraftwerk Freudenau UW	1920,67	R	0,00	Daten von VHP; Tageswerte (Wst.) ab 1996;	
Fischamend	1907,90	R	143,92	Tageswerte (Wst.) über eHYD ab 2006; zuvor HJB;	
Orth	1901,72	L	143,30 / 142,30	Tageswerte (Wst) über eHYD ab 2003; zuvor (bis 1945) Daten über viadonau verfügbar	(1)
Wildungsmauer	1894,72	R	140,48 / 139,48	Tageswerte (Wst und Abflüsse) über eHYD ab 1996	(2)
Bd. Dt. Altenburg	1886,86	R	137,18	Tageswerte (Wst.) über eHYD ab 2002, zuvor aus HJB	(1)
Hainburg	1883,92	R	135,25	Tageswerte (Wst und Abflüsse) über eHYD ab 1977; zuvor aus HJB	
Thebnerstraßl	1879,25	R	133,26	Tageswerte (Wst. und Abfüsse.) über eHYD ab 2000;	
Wolfsthal	1874,84	R	130,21	Tageswerte (Wst) über eHYD ab 1965; Abflüsse von Thebnerstraßl (ab 2000) bzw. Hainburg + Angern an der March (vor 2000), HJB	
Anm. (1): PNP-Änderung im Oktober 2019; Anm. (2): PNP-Änderung im Jänner 2004;					

Beim Pegel Orth (Abbildung 25) zeigt sich ein besonders starker und über die Periode annähernd konstant fallender Trend (-1,6 cm/a für MQ bzw. -1,8 cm/a für RNQ); für Trendbrüche gibt es keine Hinweise. Im Gegensatz dazu zeigt der Pegel Wolfsthal (Abbildung 27) einen klar steigenden Trend (+0,7 cm/a für RNQ bzw. +0,9 cm/a für MQ) mit wenig Streuung, und es gibt auch dort keine Hinweise auf einen Trendwechsel.

Für den Pegel Orth waren über eHYD nur die Daten zurück bis 2003 verfügbar; über viadonau konnten zwischenzeitlich Tagesmittelwerte zurück bis 1945 recherchiert werden, was hier, mit Abbildung 25 (Auswertung aus Klasz, 2025) noch nicht berücksichtigt ist.

Für Bad Deutsch Altenburg (Abbildung 26) zeigt sich ein annähernd gleichmäßig fallender Trend (-0,4 bzw. -0,6 cm/a), allerdings (bei 2021) mit einem Trendbruch, mit einer zuletzt starken Zunahme der Absenkungen. Das könnte ein Hinweis auf die Auswirkungen der starken Entnahmen am Geschiebefang Treuschütt (Strom-km 1888,35 bis 1887,1) sein, vgl. auch Klasz (2023).

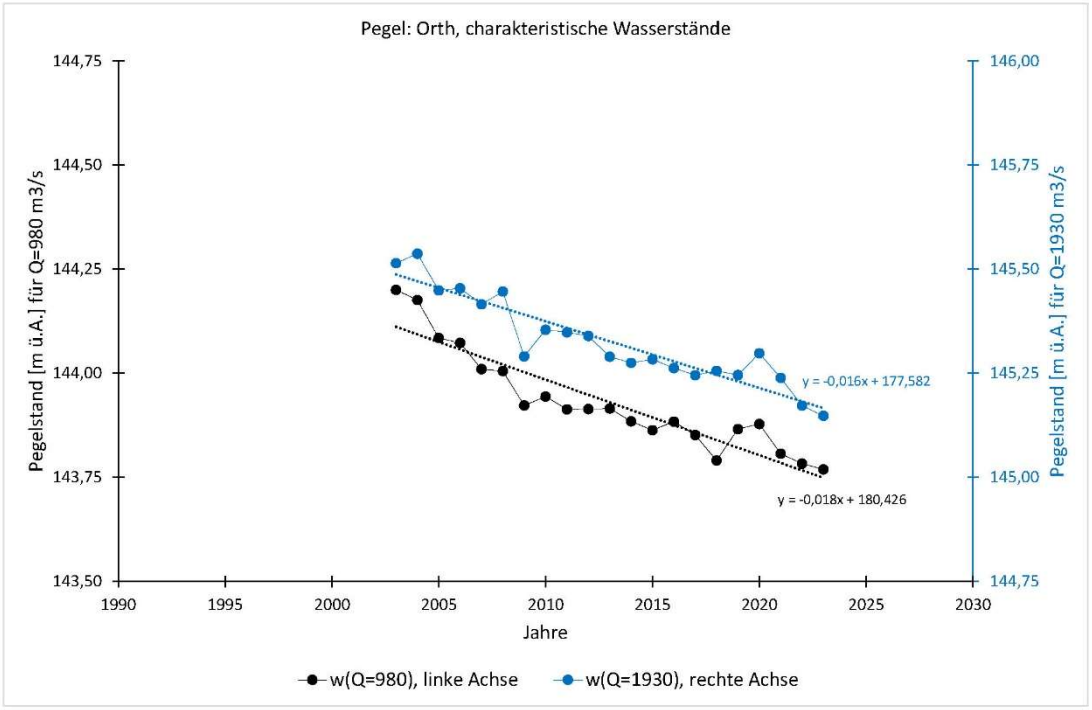


Abbildung 25: Zeitreihen der charakteristischen Wasserstände $w(RNQ)$ und $w(MQ)$ für den Pegel Orth und den Zeitraum 2003/2023 (verkürzte Reihe, über eHYD keine Rohdaten vor 2003 verfügbar); Quelle: Klasz (2025).

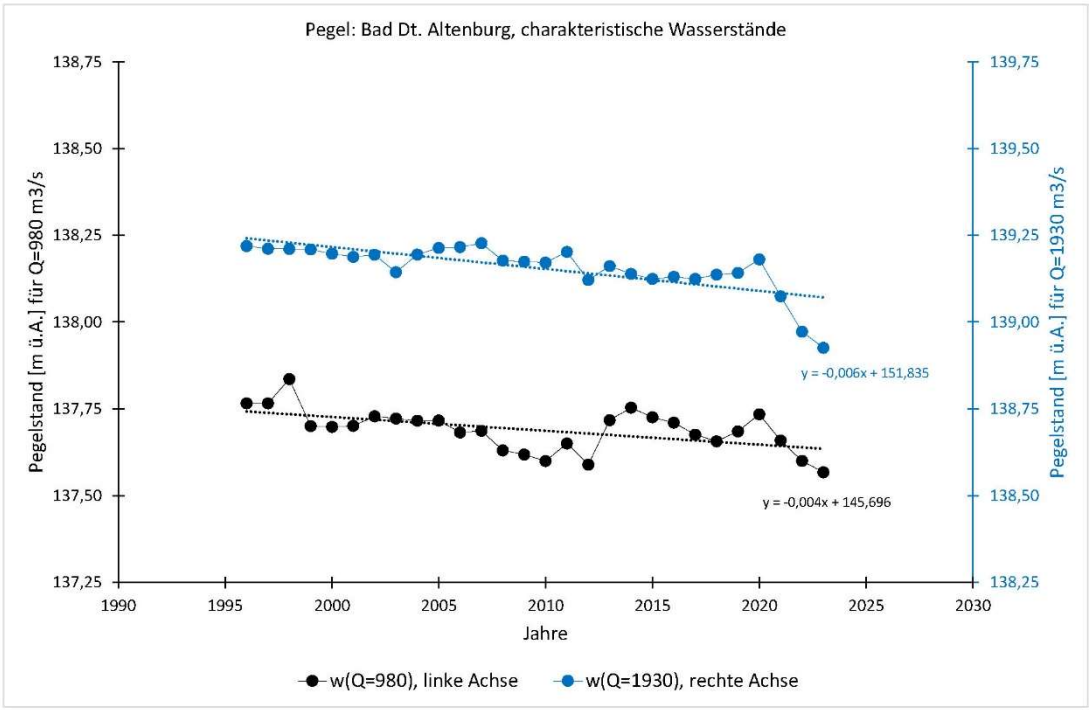


Abbildung 26: Zeitreihen der charakteristischen Wasserstände $w(RNQ)$ und $w(MQ)$ für den Pegel Bad Deutsch Altenburg und den Zeitraum 1996/2023; Quelle: Klasz (2025).

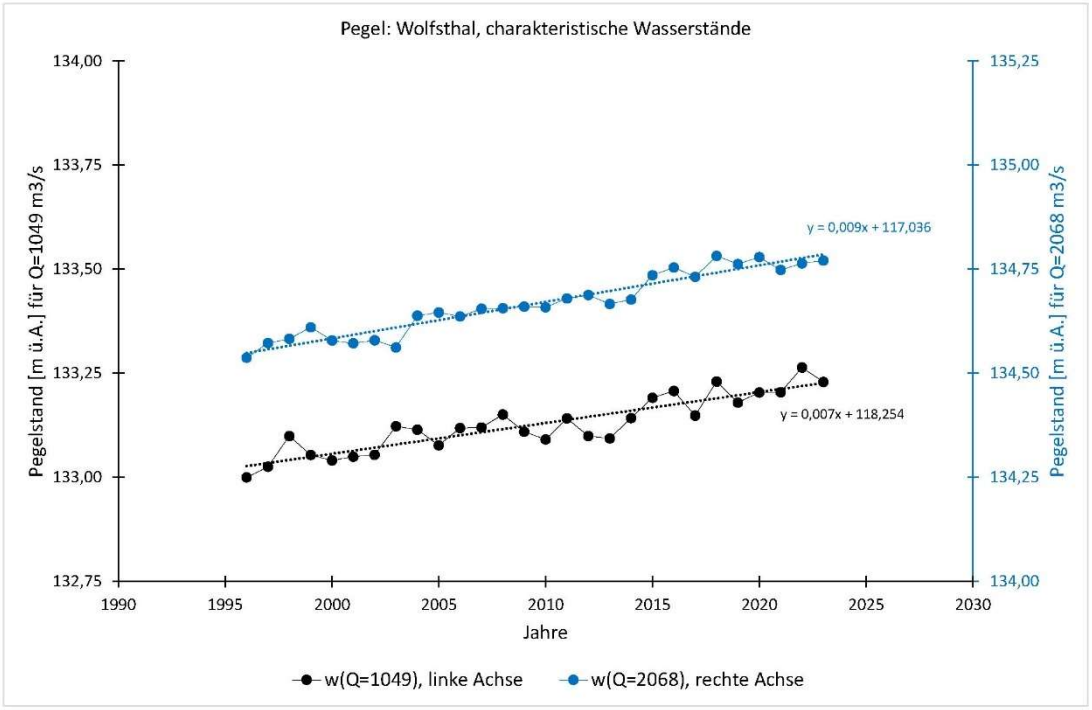


Abbildung 27: Zeitreihen der charakteristischen Wasserstände $w(RNQ)$ und $w(MQ)$ für den Pegel Wolfsthal und den Zeitraum 1996/2023; Quelle: Klasz (2025).

Abbildung 28 zeigt die Veränderungen der MW und RNW zwischen den Zuständen „2020“ (gem. KWD-2020) und „1996“ (KWD-1996) im Längenschnitt. Im untersten Bereich wirkt sich bereits der Aufstau und die Auflandungen durch die Staustufe Gabcikovo aus. Aus der Darstellung kann auch die Lage des Punktes, wo die Sohlerosionen in Auflandungen umschlagen (hydromorphologische Stauwurzel) abgeschätzt werden, für diese Periode bei etwa Strom-km 1882 (knapp stromauf der Marchmündung).

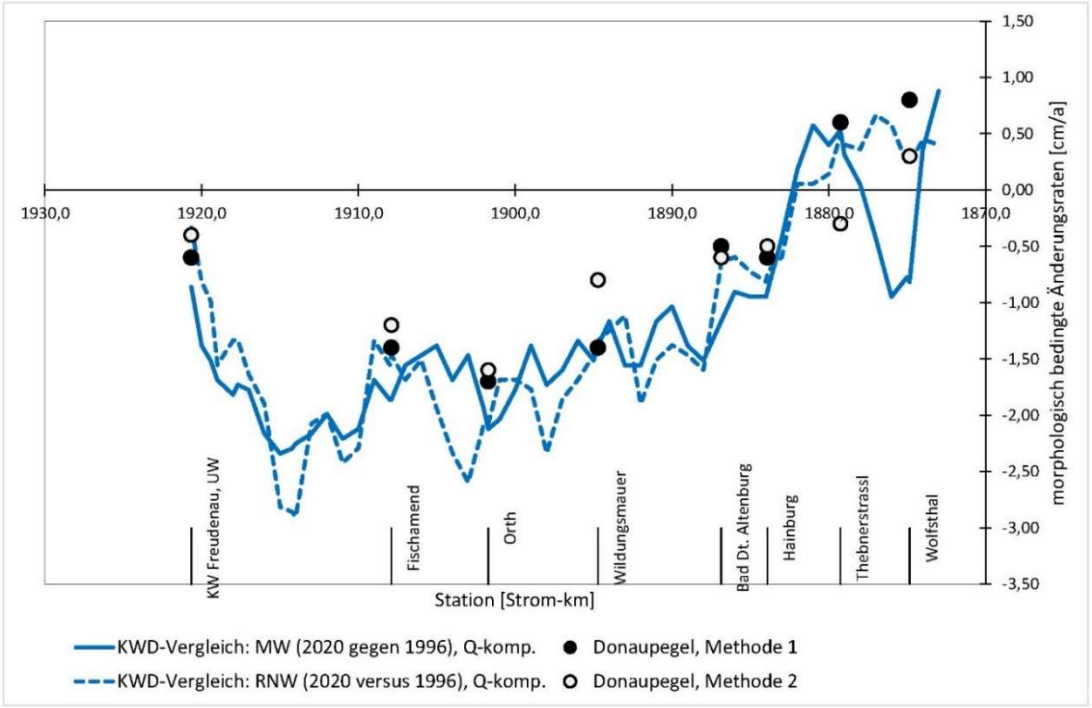


Abbildung 28: Synoptische Darstellung aller Ergebnisse im Längenschnitt (KW Freudenau, UW bis Wolfsthal), Änderungsraten nach Methode 1 (für $w(MQ)$) und Methode 2 und aus dem Vergleich der KWD-2020 gegen die KWD-1996 (für RNQ und MQ, beides Q-kompensiert).

Die starken Absenkungen der MW-Differenzen im untersten Bereich (beim Pegel Wolfsthal und knapp stromauf davon) widerspricht den pegelbezogenen Auswertungen (vgl. u.a. Abbildung 27), außerdem ist ein derartiges Auseinanderklaffen zwischen den RNW- und MW-Differenzen unter den gegebenen hydraulischen Verhältnissen völlig unplausibel; in diesem Teilabschnitt sind die MW gem. KWD-2020 offensichtlich stärker fehlerbehaftet.

6.6 Spezielle Aspekte

Zusätzlich zu den Pegeldaten sollten möglichst auch spezielle hydrologische Zustände (rund um RNQ und MQ) für Wasserspiegelaufnahmen genutzt werden. Solche zusätzlichen Wasserspiegelfixierungen wären auch eine wichtige Vorleistung für die Überarbeitung der KWDs und die Kalibrierung von hydrodynamischen Modellen und bereits unter diesen Aspekten kein verlorener Aufwand.

Nach Bearbeitungsstand (Status) bzw. Methode können drei Kategorien (Bearbeitungsstufen) solcher Wasserspiegelfixierungen unterschieden werden:

a) Primärdaten: in der Natur für verschiedene Stationen aufgenommene Wasserstände (Rohdaten);

b) Sekundärdaten: hydrographisch nachbearbeitete Wasserstände, einschl. der Interpolation für fehlende Stationen;

c) nach den hydrographischen Daten kalibrierte, berechnete Wasserspiegellagen;

ad (a.), Primärdaten: Reine Messwerte; jede Aufnahme besteht zumindest aus folgenden Daten: {Ort (Station); Wasserstand; Zeitpunkt}.

ad (b.), Sekundärdaten: Während einer Wasserspiegelaufnahme herrschen einerseits (im Allgemeinen) nicht exakt die für den gewünschten Referenzzustand (z.B. RNQ) kennzeichnenden Abflüsse, sondern etwas höhere oder tiefere Werte, und andererseits können während der Aufnahme geringfügige Abflussschwankungen (instationäre Effekte) auftreten, primär durch den Betrieb von Flusskraftwerken in der Oberliegerstrecke:

$$Q_{Aufnahme}(t) = Q_{Referenz} \pm \Delta Q(t)$$

Auf Grundlage hydrographischer Zusatzinformationen (primär: Abflussbeziehung[68] an Pegelstellen in der Strecke) können die Störeinflüsse im Abfluss $\Delta Q(t)$ in Korrekturglieder für den Wasserstand $\Delta w(t)_x$ umgerechnet und die aufgenommenen Wasserstände damit korrigiert werden:

$$w^t_{Referenz} = w^t_{Aufnahme} \pm \Delta w(t)_x$$

Zusätzlich kann ggf. auch die Beseitigung von Ausreißern, eine Glättung der Werte im Sinn eines Fehlerausgleiches im Längenschnitt und Interpolationen für Stationen ohne Daten erforderlich werden; alle diese Bearbeitungen erfolgen durch hydrographische Experten (via donau oder extern).

ad (c.): Mit der zeitlich zugehörigen Flussgeometrie können numerische Modelle (entweder 1-dim., z.B. HEC-RAS, oder 2-dim.) erstellt, auf Basis der aufgenommenen bzw. nachbehandelten Wasserstände (sh. oben) kalibriert (Rauhigkeitsparameter und Q/Wst.-Beziehung am unteren Modellrand) und damit z.B. Wasserspiegel für veränderte Abflüsse berechnet werden.

[68] Der „Pegelschlüssel“.

Für das Wasserstraßen- und Geschiebemanagement sind primär Wasserstände bzw. Wasserspiegel nach den Stufen (b.) und (c.) relevant; Primärdaten liegen primär im Arbeitsfeld der Hydrographie. Jedenfalls wäre für jeden Wasserstand bzw. Wasserspiegel sein Status evident zu halten.

Anhänge

Anhang A1	Daten zur VHP- und zur viadonau-Geschiebebewirtschaftung
Anhang A2	Daten zu den Geschiebefrachten beim Pegel Hainburg - Straßenbrücke
Anhang A3	Daten zum Sohlmaterial (charakteristische Korndurchmesser und weitere Parameter)
Anhang A4	Daten zu Tracerversuchen (unterschiedliche Korngrößen; aus der Fachliteratur)

Verwendete Abkürzungen:

BAW	Bundesanstalt für Wasserbau (Karlsruhe)
BMNT	Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (alias: BMLFRW: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft; heute: BMLUK: Bundesministerium Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft)[69]
BOKU	Universität für Bodenkultur
eHYD	elektronische Hydrographische Daten
FGP	Flussbauliches Gesamtprojekt
GIS	Geoinformationssystem
GW	Grundwasser (mst. direkt für Grundwasserstand bzw. Grundwasserspiegel)
HJB	Hydrographische Jahrbücher (herausgegeben vom HZB)
HSW	Höchster Schifffahrtswasserstand; der dem HSQ zugeordnete Wasserstand bzw. Wasserspiegel; HSQ entspricht dem Abfluss mit 1% Überschreitungsdauer, bezogen auf einen längeren Durchrechnungszeitraum (nach KWD-2020: 1991/2020)
HZB	Hydrographisches Zentralbüro (Abt. I/3 des Bundesministeriums BMLFRW)
KW	Kraftwerk (hier: Donaukraftwerk(e))
KWD	Kennzeichnende Wasserstände der österreichischen Donau; für verschiedene Bezugszeitpunkte erschienen, u.a. KWD-1996 (Wasserstraßendirektion, 1998), KWD-2010 (viadonau, 2012) und KWD-2020 (viadonau, 2023)
MQ	Mittelwasserabfluss: Mittelwert der Abflüsse über einen längeren Durchrechnungszeitraum (nach KWD-2020: 1991/2020) bzw. in anderen Zusammenhängen auch nur über ein Jahr
MW	Mittelwasser (je nach Zusammenhang ein Wasserstand oder Wasserspiegel)
NW	Niederwasser (je nach Zusammenhang ein Wasserstand oder Wasserspiegel)
RNQ	der dem RNW zugeordnete Abfluss ; entspricht dem Abfluss mit 94% Überschreitungsdauer, bezogen auf einen längeren Durchrechnungszeitraum (nach KWD-2020: 1991/2020)
RNW	Regulierungsniederwasser; der dem RNQ zugeordnete Wasserstand bzw. Wasserspiegel
UW	Unterwasser
VHP	Verbund Hydro Power (früher: Austrian Hydro Power bzw. Donaukraftwerke)
WRG	Wasserrechtsgesetz

[69] In der Vergangenheit auch noch diverse weitere Namensänderungen …

Verwendete Fachliteratur und Unterlagen:

Attal, M., and J. Lavé (2009), Pebble abrasion during fluvial transport: Experimental results and implications for the evolution of the sediment load along rivers, J. Geophys. Res., 114, F04023, doi:10.1029/2009JF001328.

BMNT (2018): Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, 2018: Endbericht der Arbeitsgruppe ‚Sohlentwicklung in der freien Fließstrecke unterstrom Kraftwerk Freudenau.

Bauer, F. (1965). Der Geschiebehaushalt der bayerischen Donau im Wandel wasserbaulicher Maßnahmen. Die Wasserwirtschaft, 55(4):106–112, 55(5):145–154.

Bogárdi, J. (1974). Sediment transport in alluvial streams (No. 04; TC175. 2, B6.). Budapest, Hungary: Akadémiai Kiadó.

Buckingham, E. (1914). On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations. Physical review, 4(4), 345.

Bundesminister für Verkehr, Abteilung Binnenschifffahrt und Wasserstraßen, Bonn, Juli 1987: Untersuchung der Abfluss- und Geschiebeverhältnisse des Rheins. Schlußbericht.

Chow, G. C. (1960). Tests of equality between sets of coefficients in two linear regressions. Econometrica: Journal of the Econometric Society, 591-605.

Constantine, C., Mount, J. F., & Florsheim, J. L. (2003): The effects of longitudinal differences in gravel mobility on the downstream fining pattern in the Cosumnes River, California. The Journal of geology, 111(2), 233-241.

Faulhaber, P.; Gabriel, T.; Gölz, E.; Kühne, E.; Riehl, K.; Schoßig, R. (2001): Erosionsstrecke der Elbe. Ergebnisse der Naturversuche zur Geschiebezugabe 1996 – 1999. Wasser- und Schifffahrtsdirektion Ost; Wasser- und Schifffahrtsamt Dresden; Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz; Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.

Felkel, K. (1970): Ideenstudie über die Möglichkeit der Verhütung von Sohlenerosion durch Geschiebezufuhr aus der Talaue ins Flussbett, dargestellt am Beispiel des Oberrheins. Mitteilungsblatt der BAW, 1970, H. 30, S. 21 – 29.

Felkel, F. (1972): Das Sohlenkorn des Rheins zwischen Straßburg und Bingen. Mitteilungsblatt der BAW, 1972, H. 32, S. 77 – 87.

Felkel, K. (1980): Die Geschiebezugabe als flussbauliche Lösung des Erosionsproblems des Oberrheins. Mitteilungsblatt der BAW, 1980, H. 47; 54 Seiten.

Felkel, K. (1987): Acht Jahre Geschiebezugabe am Oberrhein; Wasserwirtschaft, 77. Jahrgang, Heft 4 – 1987.

Ferguson, R. I., & Wathen, S. J. (1998). Tracer-pebble movement along a concave river profile: Virtual velocity in relation to grain size and shear stress. Water Resources Research, 34(8), 2031-2038.

Ferguson, R. I., Bloomer, D. J., Hoey, T. B., & Werritty, A. (2002). Mobility of river tracer pebbles over different timescales. Water Resources Research, 38(5), 3-1.

Gabriel, T., Kühne, E., Klos, S., Anlauf, A., Gölz, E., & Faulhaber, P. (2009). Das Sohlstabilisierungskonzept für die Elbe von Mühlberg bis zur Saalemündung. *Wasserbauliche Mitteilungen*, (40 S 105), 114.

Gmeiner, P., Liedermann, M., Haimann, M., Tritthart, M., & Habersack, H. (2016). Grundlegende Prozesse betreffend Hydraulik, Sedimenttransport und Flussmorphologie an der Donau. Österreichische Wasser-und Abfallwirtschaft, 68(5), 208-216.

Gruber, O. (1969): Gewässerkunde und Hydrographie im Bundesstrombauamt; Österreichische Wasserwirtschaft, Jahrgang 21 – Heft 1/2 – 1969.

Gölz, E. (2002): Iffezheim field test – three years experience with a petrographic tracer. Proceedings of an international symposium held at Alice Springs, Australia, September 2002. IAHS Publ. no 276 – 2002.

Günter (1971): Die kritische mittlere Sohlenschubspannung bei Geschiebemischungen unter Berücksichtigung der Deckschichtbildung und der turbulenzbedingten Sohlenschubspannungsschwankungen; Mitteilungen VAW Zürich.

Hassan, M. A., Church, M., & Ashworth, P. J. (1992). Virtual rate and mean distance of travel of individual clasts in gravel-bed channels. Earth surface processes and landforms, 17(6), 617-627.

Hassan, M. A., Voepel, H., Schumer, R., Parker, G., & Fraccarollo, L. (2013). Displacement characteristics of coarse fluvial bed sediment. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 118(1), 155-165.

HZB (1937): Hydrographisches Zentralbüro (1937): Schwebstoff- und Geschiebeaufnahmen einiger österreichischer Flüsse; im Selbstverlag des Hydrographischen Zentralbüros.

Klasz, G. (2014): Zu den Möglichkeiten einer Geschiebebewirtschaftung und den zugehörigen Optimierungspotentialen für die Donau östlich von Wien. Studie im Auftrag der Nationalpark Donau-Auen GmbH. Wissenschaftliche Reihe des Nationalparks Donau-Auen, Heft 37 /2015.

Klasz, G. (2025): Untersuchung zur Sohlerosion der Donau östlich von Wien über den Zeitraum 1996/2023 und damit zusammenhängende Änderungen der mittleren Grundwasser-stände an donaunahen Messstellen. Aktualisierung der Studie vom September 2024. Wissenschaftliche Reihe des Nationalparks Donau-Auen, Heft 81 /2026.

Klasz, G.; Krouzecky, N.; Reckendorfer, W.; Schmalfuß, R. und Schlögl, R. (2009a): Neue wasserbauliche Wege: Uferrückbau und Buhnenumgestaltung an der Donau östlich von Wien. Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift (ÖIAZ), 154. Jg., Heft 1-6/2009.

Klasz, G; Zottl, H.; Habersack, H. und Schmalfuß, R. (2009b): Die granulometrische Sohlverbesserung für die Donau östlich von Wien als spezielle Form der Geschiebebewirtschaftung. Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift (ÖIAZ), 154. Jg., Heft 1-6/2009.

Klasz G., Reckendorfer W., Baumgartner C., Gabriel H., Gutknecht D. (2013): River-bed degradation and overbank deposition: A human induced geomorphic disequilibrium in the Donau-Auen National Park. 5th Symposium for Research in Protected Areas (10 to 12 June, Mittersill); Conference Volume, 379-384.

Klasz, G., Gabriel, H., Habersack, H., Schmalfuß, R., Baumgartner, C. und Gutknecht, D. (2016): Ausmaß und Dynamik der Sohlerosion der Donau östlich von Wien – flussmorphologische und wasserwirtschaftliche Aspekte. Österreichische Wasser- u. Abfallwirtschaft, 68 (5-6), 199-207.

Klasz, G., Küblbäck, G., Gmeiner, P., Liedermann, M., Habersack, H., & Gutknecht, D. (2017). Kornverkleinerung durch Abrieb und Sortierung im Kontext eines Geschiebemanagements in der Donau östlich von Wien. Österreichische Wasser-und Abfallwirtschaft, 70, 220-229.

Klasz, G., C. Baumgartner (2024): Trends bei Wasserständen und mittleren Abflüssen in der Donau östlich von Wien und donaunahen Grundwasserständen: Starke Effekte durch Sohlerosion und Klimawandel. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, doi.org/10.1007/s00506-024-01090-z.

Kuhl, D. (1993): Die Geschiebezugabe unterhalb der Staustufe Iffezheim von 1978 bis 1992: Mitteilungsblatt der BAW, 1993, Nr. 70.

Liedermann, D. M., Gmeiner, P., Niederreiter, R., Tritthart, M., & Habersack, H. (2012): Innovative Methoden zum Geschiebemonitoring am Beispiel der Donau. Österr. Wasser-und Abfallwirtschaft, 64 (11-12), 527-534.

Liedermann, M., Tritthart, M., & Habersack, H. (2013): Particle path characteristics at the large gravel-bed river Danube: results from a tracer study and numerical modelling. Earth Surface Processes and Landforms, 38(5), 512-522.

Liedermann, M., Gmeiner, P., Kreisler, A., Tritthart, M., & Habersack, H. (2017). Insights into bedload transport processes of a large regulated gravel-bed river. *Earth Surface Processes and Landforms*, *43*(2), 514-523.

Linkov, I., Satterstrom, F. K., Kiker, G., Batchelor, C., Bridges, T., & Ferguson, E. 2006. From comparative risk assessment to multi-criteria decision analysis and adaptive management: Recent developments and applications. Environment International, 32(8), 1072-1093.

Lisle, T. E. (1995): Particle size variations between bed load and bed material in natural gravel bed channels. Water Resources Research, Vol. 31 (4), 1107-1118.

Meyer-Peter, E.; Lichtenhahn, C. (1963): Altes und Neues über den Flussbau – unter besonderer Berücksichtigung des sanktgallischen Rheintales; Eidg. Departement des Innern, Veröffentlichungen des Eidg. Amtes für Strassen- und Flussbau.

Mikoš, M. (1993): Fluvial abrasion of gravel sediments. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Band 123.

Munson, B. R., Young, D. F., & Okiishi, T. H. (1998): Fundamentals of Fluid Mechanics.

Parker, G. (1979). Hydraulic geometry of active gravel rivers. Journal of the Hydraulics Division, 105(9), 1185-1201.

Parker, G., & Anderson, A. G. (1977). Basic principles of river hydraulics. Journal of the Hydraulics Division, 103(9), 1077-1087.

Parker, G., & Klingeman, P. C. (1982). On why gravel bed streams are paved. Water Resources Research, 18(5), 1409-1423.

Promny, M.; Frings, M.; Gehres, N.; Busch, N.; Vollmer, S.; Gölz, E. (2010): Analyse und Bewertung der hydraulisch-morphologischen Situation zwischen Iffezheim und Mainz. Bericht, BFG-1702. Auftraggeber: Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest; BfG-SAP-Nr.: M39610304015.

Schimpf, H., Harreiter, H., Ziss, H. (2009): Zehn Jahre Erfahrungen mit der Unterwassersicherung zum Kraftwerk Freudenau; Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift (ÖIAZ) 154, Heft 1-6/2009.

Schoklitsch, A. (1933), Über die Verkleinerung der Geschiebe in Flussläufen, Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften in Wien, Math.-naturwissenschaftliche Klasse, Abt. IIa, Band 142, Heft 8, 343– 366.

Stenglein, J. (2002): Unterhaltungskonzept für den freifließenden Rhein. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 84; S 187 – 204.

Sternberg, H. (1875): Untersuchungen über Längen- und Querprofil geschiebeführender Flüsse. Zeitschrift für Bauwesen, Vol.25, pp.483-506.

Surian, N. (2002): Downstream variation in grain size along an Alpine river: analysis of controls and processes. Geomorphology, 43 (2002), 137-149.

BOKU, IWA & Ingenieurbüro Klasz (2022): Universität für Bodenkultur, Institut für Wasserbau, Hydraulik und Fließgewässerforschung (IWA) & Ingenieurbüro KLASZ (2022): Studie zum Sohlmaterial der Donau in der Wachau und in der Strecke östlich von Wien; Studie im Auftrag der viadonau (unveröffentlicht).

Van Rijn, L. C. (1984): Sediment transport, part I: bed load transport. Journal of Hydraulic Engineering, 110(10), 1431-1456.

viadonau (2012): Die kennzeichnenden Wasserstände der österreichischen Donau. KWD 2010. Nach dem Stande vom 31. Dezember 2010. (digital verfügbare Version).

viadonau (2023): Die kennzeichnenden Wasserstände der österreichischen Donau. KWD 2020. (digital verfügbare Version).

Wasserstraßendirektion (1998): Die kennzeichnenden Wasserstände der österreichischen Donau. Nach dem Stande vom 31. Dezember 1996. Herausgegeben im Selbstverlag der Wasserstraßendirektion.

Wolman, M. G., & Miller, J. P. (1960). Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. The Journal of geology, 68(1), 54-74.

Zottl & Erber Ingenieurbüro (1987): Donau im Raum Wien - Bad Deutsch-Altenburg, Untersuchung der Sohlstabilität im Zusammenhang mit der Staustufe Wien; Studie im Auftrag der Stadt Wien – MA 45 (Wasserbau).

Daten zur VHP-Geschiebebewirtschaftung und zur viadonau-Geschiebebewirtschaftung
Angaben der Verbund Hydro Power zu den Geschiebezugaben (in der Erhaltungsstrecke)
Angaben der viadonau zu Instandhaltungsbaggerungen und Geschieberückführungen

Parameter:

M1	Geschiebezugaben der VHP (in der Erhaltungsstrecke)
M2	Baggermengen (Instandhaltungsbaggerungen in der Fahrrinne)
M3a	umgelagerte Mengen, Geschiebefang Treuschütt
M3b	umgelagerte Mengen, Geschiebefang Hainburg
TL	gesamte Transportleistung (Baggermenge x Transportweite)

	VHP Erhaltungsstrecke		viadonau stromab der Erhaltungsstrecke				
Jahr	M1 = [m3]	Quelle: [Text]	M2 = [m3]	M3a = [m3]	M3b = [m3]	TL = [m3.km]	Quelle: [Text]
1996	157 000	[1]				keine	
1997	156 300	[1]				keine	
1998	196 400	[1]				keine	
1999	166 100	[1]				keine	
2000	199 100	[1]				keine	
2001	85 900	[1]				keine	
2002	305 500	[1]				keine	
2003	224 800	[1]				keine	
2004	196 200	[1]				keine	
2005	206 500	[1]				keine	
2006	204 100	[1]				keine	
2007	240 350	[1]				keine	
2008	182 800	[1]				keine	
2009	165 130	[2]	50 112	0	0	327 834	[5]
2010	215 755	[2]	119 417	0	0	542 929	[5, 6]
2011	96 135	[2]	176 005	0	0	602 419	[5, 6]
2012	161 645	[2]	66 807	0	0	373 825	[5, 6]
2013	195 060	[2]	131 191	0	0	340 629	[5, 6]
2014	234 585	[2]	201 477	0	0	755 139	[5, 6]
2015	185 190	[2]	244 497	0	0	2 763 233	[5, 6]
2016	174 320	[2]	282 334	0	0	3 008 943	[5, 6]
2017	153 245	[2]	199 119	50 000	0	2 887 459	[5, 6]
2018	225 669	[3]	118 193	64 232	0	1 630 045	[6]
2019	258 213	[3]	97 692	89 236	0	2 370 995	[6]
2020	246 767	[3]	55 268	63 849	0	1 529 625	[6]
2021	238 437	[3]	67 641	49 233	80 001	1 633 134	[6]
2022	213 238	[3]	32 089	62 759	49 424	1 807 224	[6]
2023	176 534	[4]	83 647	40 465	65 937	2 333 428	[6]
2024	176 445	[4]	212 967	19 041	53 968	3 064 714	[6]
2025	279 596	[4]	165 124	29 971	82 250	2 972 852	[7], (a.)

Daten-Quellen:

[1] Schimpf et al. (2009)
[2] Persönliche Auskunft Dr. R. Schmalfuss / Verbund Hydro Power (13.11.2017)
[3] VHP, Geschiebezugabe Erhaltungsstrecke, Jahresberichte 2018 - 2022
[4] Persönliche Auskunft Dr. R. Schmalfuss / Verbund Hydro Power (03.07.2026)
[5] Klasz et al. (2017) nach Angaben der viadonau (Dipl.Ing. Simoner)
[6] viadonau, Übersicht zu Geschiebemanagement & Analyse der Sohländerungen, 19.11.2025
[7] viadonau, Übersicht zu Geschiebemanagement & Analyse der Sohländerungen, 09.04.2026

Ingenieurbüro Klasz
im Auftrag der Nationalpark Donau-Auen GmbH.

Daten zu den Geschiebefrachten beim Pegel Hainburg-Strassenbrücke
nach Angaben des Hydrographischen Dienstes (eHYD)

GF1 Geschiebefrachten (Jahresmittel) in [kg/s]
GF1' Geschiebefrachten (Jahresmittel) in [t/a]
GF2 volumetrische Geschiebefrachten (Jahresmittel) in [m3/a], Umrechnung über Lagerungsdichte 1800 kg/m3 und gerundet
GF3 volumetrische Geschiebefrachten (Jahresmittel) in [m3/a], Umrechnung über Lagerungsdichte 1700 kg/m3 und gerundet
MQ mittlere Abflüsse (Jahresmittel) am Pegel Hainburg

Jahr	GF1 [kg/s]	GF1' [t/a]	GF2 [m3/a]	GF3 [m3/a]	MQ [m3/s]	Quelle: [Text]
1996	12,03	379500	211000	223400	1856	Anm. (a.)
1997	12,42	392000	217900	230700	1866	Anm. (a.)
1998	11,36	358500	199300	211000	1804	Anm. (a.)
1999	17,34	547200	304200	322100	2215	Anm. (a.)
2000	16,24	512400	284900	301600	2168	Anm. (a.)
2001	14,50	457600	254400	269400	2040	Anm. (a.)
2002	21,79	687500	382200	404700	2509	Anm. (a.)
2003	8,50	268200	149100	157900	1553	Anm. (a.)
2004	10,03	316500	175900	186300	1700	Anm. (a.)
2005	13,51	426300	237000	250900	1913	Anm. (a.)
2006	15,15	478200	265800	281500	2008	Anm. (a.)
2007	10,81	341300	189700	200900	1773	Anm. (a.)
2008	10,80	340700	189400	200600	1772	[8]
2009	15,05	474800	264000	279500	2053	[8]
2010	12,76	402800	223900	237100	1903	[8]
2011	8,33	262700	146100	154700	1546	[8]
2012	13,36	421500	234300	248100	1987	[8]
2013	18,44	581800	323500	342500	2231	[8]
2014	10,20	321700	178900	189400	1698	[8]
2015	9,46	298600	166000	175800	1625	[8]
2016	12,52	395100	219700	232600	1874	[8]
2017	10,52	332000	184600	195400	1768	[8]
2018	8,74	275700	153300	162300	1571	[8]
2019	12,09	381500	212100	224600	1875	[8]
2020	9,30	293600	163200	172800	1674	[8]
2021	10,61	334800	186100	197100	1720	[8]
2022	7,94	250400	139200	147400	1538	[8]
2023	13,35	421400	234300	248100	1907	[8]
Mean =	12,40	391225	217500	230300	1862	Mittelwert (1996 / 2023)
Mean =	11,47	361819	201163	213000	1796	Mittelwert (2008 / 2023)

Daten-Quellen:
[8] Hydrographischer Dienst, eHYD, Daten zum Geschiebetransport Pg. Hainburg Strassenbrücke

Anm. (a.): nach GT-Funktion (für 2008/2009) und Tagesmittel der Abflüsse gerechnet

Daten zum Sohlmaterial

aus den Sieblinien von Sohlmaterialproben abgeleitete charakteristische Korndurchmesser und weitere Parameter

Parameter:

Datum:	Entnahmedatum
Station:	Entnahmeort (Längenschnitt)
Lage:	Entnahmeort (Lage im Querschnitt)
d =	Uferabstand (nur bei den Daten aus den beiden Entnahmekampagnen 2020)
Mg	abgesiebte Menge (für die Sieblinie)
D16	Korndurchmesser mit 16% Siebdurchgang
D50	Korndurchmesser mit 50% Siebdurchgang (mittlerer Korndurchmesser im Sinn eines Medians)
D84	Korndurchmesser mit 84% Siebdurchgang
D90	Korndurchmesser mit 90% Siebdurchgang
Dmax	Grösstkorn-Durchmesser (=b-Achse des Grösstkornes)
Mmax	Masse des Grösstkornes
p(sa)	Sandanteil (D < 2 mm)
p(st)	Stein- bzw. Grobkornanteil (D > 63 mm)
σg	Sortierparameter = (D84/D16)^0,5

Nr.: [Text]	Datum: [Datum]	Station: [Strom-km]	Lage: [Text]	Lage: [Text]	Mg = [kg]	D16 = [mm]	D50 = [mm]	D84 = [mm]	D90 = [mm]	Dmax = [mm]	Mmax = [kg]	p(sa) = [%]	p(st) = [%]	σg = [-]	Quelle: [Text]
ZE_001	14./17.07.1987	1881,30	L	L+40m	561,0	3,0	18,5	46,1	56,9	100	n.v.	n.v.	7,1%	3,90	[9]
ZE_002	14./17.07.1987	1881,30	M	Mitte	518,9	9,6	16,5	28,6	35,1	100	n.v.	n.v.	1,9%	1,73	[9]
ZE_003	14./17.07.1987	1881,30	R	R+50m	558,3	7,9	22,5	43,9	50,8	102	n.v.	n.v.	4,0%	2,36	[9]
ZE_004	14./17.07.1987	1885,20	L	L+30m	586,9	3,4	17,7	44,2	51,6	98	n.v.	n.v.	3,5%	3,62	[9]
ZE_005	14./17.07.1987	1885,20	M	Mitte	562,7	4,1	17,4	50,3	61,4	100	n.v.	n.v.	9,1%	3,49	[9]
ZE_006	14./17.07.1987	1885,20	M	Mitte	681,2	2,9	15,1	46,3	56,4	107	n.v.	n.v.	6,4%	4,00	[9]
ZE_007	14./17.07.1987	1885,20	R	R+80m	506,7	11,9	23,7	40,0	47,7	86	n.v.	n.v.	2,6%	1,83	[9]
ZE_008r	14./17.07.1987	1888,55	R	R+70m	556,8	15,7	29,0	46,1	51,1	110	n.v.	n.v.	2,6%	1,71	[9]
ZE_009	14./17.07.1987	1890,30	M	Mitte	511,7	10,0	20,8	40,0	49,0	100	n.v.	n.v.	3,5%	2,00	[9]
ZE_010	14./17.07.1987	1895,00	M	Mitte	594,8	2,5	19,1	52,5	59,6	100	n.v.	n.v.	7,1%	4,61	[9]
ZE_011	14./17.07.1987	1895,00	R	R+30m	455,2	5,9	19,9	37,7	44,7	100	n.v.	n.v.	1,5%	2,53	[9]
ZE_012	14./17.07.1987	1894,99	R	R+40m	592,6	12,5	23,7	39,7	46,5	80	n.v.	n.v.	2,4%	1,78	[9]
ZE_013	14./17.07.1987	1900,90	L	L+60m	510,0	2,9	20,4	56,8	64,0	120	n.v.	n.v.	10,5%	4,39	[9]
ZE_014	14./17.07.1987	1905,00	R	R+30m	557,2	4,8	18,7	40,7	53,3	130	n.v.	n.v.	6,8%	2,90	[9]
ZE_015	14./17.07.1987	1905,00	M	Mitte	600,7	2,5	17,6	61,5	74,1	167	n.v.	n.v.	15,0%	4,93	[9]

ZE_016	14./17.07.1987	1905,00	L	L+80m	557,8	4,5	22,9	58,8	68,5	124	n.v.	n.v.	12,8%	3,63	[9]
ZE_017	14./17.07.1987	1908,60	M	Mitte	601,9	5,0	19,7	48,2	57,8	105	n.v.	n.v.	6,9%	3,09	[9]
ZE_018	14./17.07.1987	1913,70	M	L+100m	566,8	3,9	25,7	56,4	63,4	115	n.v.	n.v.	10,2%	3,81	[9]
ZE_019	14./17.07.1987	1913,70	M	L+110m	617,0	4,9	22,6	55,7	64,0	128	n.v.	n.v.	10,5%	3,38	[9]
ZE_020	14./17.07.1987	1914,60	R	R+40m	642,2	18,4	33,2	55,3	62,9	115	n.v.	n.v.	9,9%	1,73	[9]
ZE_021	14./17.07.1987	1917,80	R	R+40m	565,1	7,9	28,0	63,3	71,8	130	n.v.	n.v.	16,2%	2,84	[9]
ZE_022	14./17.07.1987	1917,80	R	R+50m	550,9	12,2	31,5	59,3	66,9	100	n.v.	n.v.	12,1%	2,20	[9]
ZE_023	14./17.07.1987	1917,80	M	Mitte	465,9	2,8	11,7	32,1	41,1	130	n.v.	n.v.	3,8%	3,38	[9]
ZE_024	14./17.07.1987	1920,60	L	L+100m	456,9	7,5	27,3	55,9	62,4	100	n.v.	n.v.	9,4%	2,74	[9]

Nr.: [Text]	Datum: [Datum]	Station: [Strom-km]	Lage: [Text]	d = [m]	Mg = [kg]	D16 = [mm]	D50 = [mm]	D84 = [mm]	D90 = [mm]	Dmax = [mm]	Mmax = [kg]	p(sa) = [%]	p(st) = [%]	σg = [-]	Quelle: [Text]
	1. Entnahmekampagne:														
G0001	14.04.2020	1920,00	R	264	192,0	5,66	39,93	104,32	119,95	194,0	10,27	7,1%	36,3%	4,29	[10]
G0002	14.04.2020	1920,00	M	207	205,9	4,52	29,56	74,19	93,17	177,0	7,21	12,4%	20,3%	4,05	[10]
G0003	14.04.2020	1920,00	L	145	175,1	6,02	22,21	57,88	84,30	251,0	16,92	6,0%	13,1%	3,10	[10]
G0004	14.04.2020	1919,00	M	201	210,2	4,19	41,63	112,74	133,46	196,0	6,21	8,6%	37,1%	5,19	[10]
G0005	14.04.2020	1918,00	R	307	215,9	9,91	24,30	53,03	63,93	238,3	5,84	2,5%	10,2%	2,31	[10]
G0006	14.04.2020	1918,00	M	248	188,4	3,11	31,42	90,63	104,49	198,0	4,65	10,7%	31,2%	5,40	[10]
G0007	14.04.2020	1918,00	L	187	142,8	3,33	30,05	79,17	92,86	187,0	4,56	10,7%	25,4%	4,87	[10]
G0008	14.04.2020	1917,80	R	310	285,8	7,82	53,70	125,27	143,81	223,0	8,95	3,3%	45,5%	4,00	[10]
G0009	14.04.2020	1917,80	L	172	197,6	2,74	20,50	62,40	82,71	327,0	37,50	12,9%	15,6%	4,77	[10]
G0010	14.04.2020	1917,00	M	105	312,4	2,53	15,64	40,04	53,98	134,1	2,28	13,2%	7,6%	3,98	[10]
G0011	14.04.2020	1916,00	R	151	217,3	2,66	20,07	44,96	54,49	137,6	1,04	14,2%	5,5%	4,11	[10]
G0012	14.04.2020	1916,00	M	93	217,3	3,39	22,16	74,62	89,11	340,0	37,16	11,4%	21,7%	4,69	[10]
G0013	14.04.2020	1916,00	L	31	221,4	16,39	66,46	115,49	127,90	177,0	4,22	1,9%	53,0%	2,65	[10]
G0014	14.04.2020	1915,30	M	185	224,6	2,18	19,03	54,71	65,44	242,0	10,70	15,2%	10,9%	5,01	[10]
G0015	14.04.2020	1915,00	M	209	140,9	4,48	15,92	64,33	92,71	177,0	8,77	7,1%	16,3%	3,79	[10]
G0016	14.04.2020	1914,60	R	220	198,3	9,72	34,61	70,64	79,08	119,0	1,69	3,4%	22,1%	2,70	[10]
G0017	14.04.2020	1914,00	R	205	253,0	3,02	29,33	71,41	81,26	118,9	1,67	11,5%	21,8%	4,86	[10]
G0018	14.04.2020	1914,00	M	144	196,6	5,91	20,13	44,28	55,51	154,2	4,82	7,4%	6,8%	2,74	[10]
G0019	14.04.2020	1914,00	L	83	251,4	2,75	17,80	60,44	71,30	102,2	1,01	12,6%	14,6%	4,69	[10]
G0020	14.04.2020	1913,70	M	104	242,7	4,91	26,04	55,98	66,00	136,8	1,20	7,2%	11,4%	3,38	[10]
G0021	14.04.2020	1913,00	M	76	221,9	1,55	16,16	46,89	55,09	106,6	0,86	18,2%	5,0%	5,51	[10]
G0022	14.04.2020	1912,00	R	203	222,5	2,94	20,49	44,81	55,95	133,4	2,41	12,9%	6,8%	3,91	[10]
G0023	14.04.2020	1912,00	M	142	190,1	2,60	17,66	42,21	50,24	91,8	1,06	13,6%	3,2%	4,03	[10]
G0024	14.04.2020	1912,00	L	82	241,7	5,21	21,37	48,17	56,44	117,4	1,09	6,4%	5,8%	3,04	[10]
G0025	14.04.2020	1911,00	M	209	234,6	4,52	21,03	71,93	84,40	136,0	1,06	9,3%	21,0%	3,99	[10]
G0026	14.04.2020	1910,00	R	221	224,3	5,66	25,29	50,49	58,52	109,8	1,31	7,0%	7,0%	2,99	[10]

G0027	14.04.2020	1910,00	M	169	205,8	3,60	27,07	61,59	72,46	132,9	1,72	11,3%	15,0%	4,14	[10]
G0028	14.04.2020	1910,00	L	109	223,5	1,15	12,90	51,10	59,30	123,6	2,69	22,4%	7,6%	6,66	[10]
G0029	14.04.2020	1909,55	L	30	233,6	5,55	18,73	40,01	48,35	98,6	1,55	4,3%	4,6%	2,69	[10]
G0030	14.04.2020	1909,15	L	20	238,1	15,53	39,51	72,58	79,53	111,8	1,48	4,1%	25,3%	2,16	[10]
G0031	14.04.2020	1909,00	M	86	221,6	6,49	16,17	33,84	40,44	101,7	1,01	2,9%	1,2%	2,28	[10]
G0032	14.04.2020	1908,60	M	129	216,3	5,03	24,27	42,14	51,90	95,7	0,64	8,8%	5,5%	2,89	[10]
G0033	14.04.2020	1908,20	M	224	197,7	1,47	15,84	45,81	56,97	145,5	2,21	18,9%	7,2%	5,58	[10]
G0034	14.04.2020	1908,00	R	251	253,5	10,87	29,68	56,08	65,02	99,5	0,72	2,0%	10,9%	2,27	[10]
G0035	14.04.2020	1908,00	M	204	180,5	2,09	23,55	71,68	80,75	121,6	3,07	15,6%	22,5%	5,86	[10]
G0036	14.04.2020	1908,00	L	158	203,4	3,63	28,36	76,96	88,17	140,3	2,33	11,6%	24,8%	4,61	[10]
G0037	14.04.2020	1907,85	L	230	272,3	2,70	19,27	52,60	63,43	105,6	1,46	11,7%	10,2%	4,42	[10]
G0038	14.04.2020	1907,75	L	215	200,4	4,36	26,22	62,86	73,48	148,3	3,06	9,8%	15,9%	3,80	[10]
G0039	14.04.2020	1907,20	M	113	233,6	2,29	16,54	55,25	65,50	155,5	1,64	14,0%	11,1%	4,91	[10]
G0040	14.04.2020	1907,00	M	87	210,5	2,63	16,43	45,98	58,62	108,7	2,49	13,6%	8,2%	4,18	[10]
G0041	14.04.2020	1906,45	L	25	217,4	3,50	24,56	57,61	67,31	116,6	1,31	11,5%	11,9%	4,06	[10]
G0042	15.04.2020	1906,40	L	40	227,5	5,60	34,39	78,20	90,58	132,0	1,52	7,7%	24,9%	3,74	[10]
G0043	15.04.2020	1906,00	R	158	197,8	2,07	20,85	49,72	57,20	97,7	2,22	15,7%	5,9%	4,90	[10]
G0044	15.04.2020	1906,00	M	98	213,1	2,48	20,78	56,11	65,78	120,9	1,72	13,5%	11,1%	4,76	[10]
G0045	15.04.2020	1906,00	L	38	247,8	1,59	20,21	55,11	66,12	118,2	0,90	17,7%	11,4%	5,88	[10]
G0046	15.04.2020	1905,40	M	197	229,8	2,74	17,38	54,00	61,79	104,9	0,95	10,6%	9,1%	4,44	[10]
G0047	15.04.2020	1905,00	R	317	241,7	1,86	19,92	41,55	47,82	87,8	0,37	16,5%	1,0%	4,73	[10]
G0048	15.04.2020	1905,00	M	242	248,5	2,30	19,26	57,21	69,62	133,3	2,58	14,5%	13,3%	4,99	[10]
G0049	15.04.2020	1905,00	L	173	212,3	1,59	21,96	52,64	59,92	99,8	1,26	17,7%	7,7%	5,76	[10]
G0050	15.04.2020	1904,00	R	346	205,9	5,45	26,70	55,53	63,65	108,3	1,00	8,5%	10,3%	3,19	[10]
G0051	15.04.2020	1904,00	M	285	187,3	4,05	15,57	42,39	51,24	112,7	1,09	4,1%	3,7%	3,23	[10]
G0052	15.04.2020	1904,00	L	225	210,6	3,89	14,87	38,30	46,04	81,8	0,64	9,4%	1,9%	3,14	[10]
G0053	15.04.2020	1903,00	M	241	209,6	4,85	24,80	53,43	62,95	97,8	1,62	8,3%	10,0%	3,32	[10]
G0054	15.04.2020	1902,00	R	174	192,3	5,36	24,34	48,85	57,62	126,3	1,15	11,0%	6,8%	3,02	[10]
G0055	15.04.2020	1902,00	M	108	258,6	7,95	20,97	40,39	46,27	111,7	2,72	3,3%	2,1%	2,25	[10]
G0056	15.04.2020	1902,00	L	41	211,0	0,98	16,26	38,27	47,82	124,0	1,63	20,8%	4,0%	6,25	[10]
G0057	15.04.2020	1901,00	M	184	267,2	2,79	18,77	45,96	53,84	104,1	2,16	11,7%	4,0%	4,06	[10]
G0058	15.04.2020	1900,90	L	150	222,8	10,14	25,78	45,95	52,69	91,4	1,15	0,9%	2,2%	2,13	[10]
G0059	15.04.2020	1900,00	R	259	211,8	5,60	23,71	45,93	54,58	100,4	0,77	8,7%	5,0%	2,86	[10]
G0060	15.04.2020	1900,00	M	197	224,3	3,74	20,33	60,40	71,14	128,0	1,81	10,5%	14,3%	4,02	[10]
G0061	15.04.2020	1900,00	L	135	183,2	11,62	27,32	57,37	70,36	118,6	3,17	5,4%	12,3%	2,22	[10]
G0062	15.04.2020	1899,00	M	123	185,7	6,29	19,88	43,70	55,60	112,6	2,27	3,3%	7,2%	2,64	[10]
G0063	15.04.2020	1898,60	M	192	196,1	2,04	19,41	45,69	55,48	103,5	1,04	15,8%	6,1%	4,73	[10]
G0064	15.04.2020	1898,00	R	272	190,3	3,96	21,63	59,88	74,86	164,1	2,74	12,0%	15,1%	3,89	[10]
G0065	15.04.2020	1898,00	M	214	216,4	7,29	19,14	39,69	49,19	99,3	0,55	6,6%	4,5%	2,33	[10]

G0066	15.04.2020	1898,00	L	157	258,6	6,44	26,74	53,38	61,49	121,6	1,28	9,5%	9,0%	2,88	[10]
G0067	15.04.2020	1897,00	M	208	219,4	7,85	18,09	34,45	40,30	76,3	0,56	0,3%	0,8%	2,09	[10]
G0068	15.04.2020	1896,00	R	235	222,4	4,29	24,67	58,15	67,97	102,8	0,59	10,5%	12,5%	3,68	[10]
G0069	15.04.2020	1896,00	M	188	264,3	1,87	18,30	44,67	54,53	113,5	0,54	16,3%	5,7%	4,89	[10]
G0070	15.04.2020	1896,00	L	140	231,2	3,54	14,16	30,97	39,13	99,1	1,24	12,7%	2,0%	2,96	[10]
G0071	15.04.2020	1895,65	R	280	259,5	7,43	24,35	47,33	56,20	109,5	1,74	6,2%	6,0%	2,52	[10]
G0072	15.04.2020	1895,00	R	344	206,6	1,17	13,22	40,37	51,55	120,0	2,01	20,8%	5,5%	5,88	[10]
G0073	15.04.2020	1895,00	M	258	176,8	4,53	19,57	41,00	49,70	99,9	1,19	11,3%	5,0%	3,01	[10]
G0074	15.04.2020	1895,00	L	197	196,4	1,25	19,11	48,44	57,10	94,5	1,16	20,3%	6,4%	6,23	[10]
G0075	15.04.2020	1894,65	R	330	233,5	9,29	24,46	42,92	49,49	88,4	0,67	4,3%	2,0%	2,15	[10]
G0076	15.04.2020	1894,55	R	300	173,8	4,37	23,79	52,68	59,60	108,1	1,99	7,7%	7,3%	3,47	[10]
G0077	15.04.2020	1894,25	R	300	268,2	2,21	19,36	51,99	62,35	113,1	1,77	15,0%	9,7%	4,85	[10]
G0078	15.04.2020	1894,00	R	278	193,9	2,79	28,41	65,64	79,62	124,3	2,26	13,4%	17,3%	4,85	[10]
G0079	15.04.2020	1894,00	M	217	211,7	6,62	19,95	41,03	49,04	99,2	0,98	2,1%	3,1%	2,49	[10]
G0080	15.04.2020	1894,00	L	157	209,1	4,22	18,55	39,61	46,41	100,6	1,08	8,5%	2,5%	3,07	[10]
G0081	15.04.2020	1893,70	M	168	207,6	2,56	17,96	45,12	54,01	92,7	0,77	13,1%	4,9%	4,20	[10]
G0082	15.04.2020	1893,00	M	256	186,6	1,74	21,42	68,25	79,35	135,2	1,16	17,7%	19,2%	6,27	[10]
G0083	15.04.2020	1892,70	M	252	184,0	4,46	21,57	51,12	62,22	125,1	2,51	9,2%	9,6%	3,39	[10]
G0084	15.04.2020	1892,30	M	215	154,1	2,62	19,34	55,82	66,28	126,4	1,61	12,8%	11,4%	4,62	[10]
G0085	15.04.2020	1892,00	R	251	249,6	10,41	27,80	46,37	53,94	101,8	0,70	7,0%	3,8%	2,11	[10]
G0086	15.04.2020	1892,00	M	190	219,7	1,86	20,86	56,37	67,22	119,1	1,12	16,6%	12,1%	5,50	[10]
G0087	15.04.2020	1892,00	L	129	263,3	1,51	17,77	48,18	57,22	112,2	1,03	18,7%	6,6%	5,66	[10]
G0088	15.04.2020	1891,20	M	124	218,7	8,00	16,64	39,33	47,46	110,4	1,02	4,2%	2,9%	2,22	[10]
G0089	15.04.2020	1891,00	M	116	255,7	4,46	16,21	36,51	42,59	86,5	0,80	7,6%	0,8%	2,86	[10]
G0090	15.04.2020	1890,30	M	179	247,0	6,67	22,63	48,23	56,95	101,2	1,73	3,5%	6,4%	2,69	[10]
G0091	15.04.2020	1890,00	R	300	227,4	0,91	23,45	42,37	49,71	98,9	0,62	17,3%	3,6%	6,83	[10]
G0092	15.04.2020	1890,00	M	240	223,5	3,64	14,58	30,94	38,18	96,6	1,48	12,1%	1,0%	2,91	[10]
G0093	15.04.2020	1890,00	L	179	202,2	2,16	23,16	63,68	73,13	134,8	0,84	15,2%	16,5%	5,43	[10]
G0094	16.04.2020	1889,00	M	278	222,3	7,81	25,68	63,72	74,91	110,3	1,45	3,1%	16,4%	2,86	[10]
G0095	16.04.2020	1888,90	M	275	210,9	3,30	26,71	59,49	70,32	117,2	1,09	11,3%	13,6%	4,25	[10]
G0096	16.04.2020	1888,75	R	270	185,3	4,98	14,70	39,97	50,89	222,0	9,64	6,9%	5,0%	2,83	[10]
G0097	16.04.2020	1888,55	R	274	234,3	2,31	7,30	18,62	23,91	91,6	0,64	12,6%	0,7%	2,84	[10]
G0098	16.04.2020	1888,45	M	150	259,1	4,87	19,42	47,77	57,43	128,4	1,73	8,6%	7,0%	3,13	[10]
G0099	16.04.2020	1888,30	M	133	187,8	8,12	19,99	39,57	46,01	112,4	2,58	0,2%	3,8%	2,21	[10]
G0100	16.04.2020	1888,15	M	155	207,3	2,92	19,54	44,25	54,63	98,2	1,14	12,8%	6,1%	3,89	[10]
G0101	16.04.2020	1888,00	R	217	217,7	15,39	29,22	46,83	54,67	129,2	1,67	0,1%	4,5%	1,74	[10]
G0102	16.04.2020	1888,00	M	162	279,8	5,09	19,14	40,61	48,33	105,5	0,54	2,7%	2,3%	2,83	[10]
G0103	16.04.2020	1888,00	L	107	208,3	1,05	13,61	43,29	52,11	104,3	1,76	22,8%	3,9%	6,43	[10]
G0104	16.04.2020	1887,85	M	160	217,8	9,37	18,88	34,21	41,13	96,6	0,80	0,1%	1,7%	1,91	[10]

G0105	16.04.2020	1887,70	M	185	242,0	9,32	17,03	29,35	34,09	68,5	0,26	0,1%	0,0%	1,77	[10]
G0106	16.04.2020	1887,40	M	168	183,9	5,03	22,02	48,80	59,33	109,9	1,22	8,6%	8,2%	3,11	[10]
G0107	16.04.2020	1887,00	M	244	182,2	9,00	19,31	39,05	46,67	101,0	1,04	2,5%	2,9%	2,08	[10]
G0108	16.04.2020	1886,40	M	216	252,1	4,08	15,36	43,24	52,47	97,3	1,88	8,5%	4,5%	3,25	[10]
G0109	16.04.2020	1886,00	R	247	226,8	2,53	23,23	50,93	58,20	113,9	1,00	14,4%	6,4%	4,49	[10]
G0110	16.04.2020	1886,00	M	191	254,8	3,12	16,91	48,08	58,34	103,4	1,65	12,0%	7,6%	3,92	[10]
G0111	16.04.2020	1886,00	L	138	232,8	4,59	23,90	53,44	60,66	112,2	1,32	11,2%	8,2%	3,41	[10]
G0113	16.04.2020	1885,20	M	130	221,4	10,96	24,04	39,27	43,44	87,0	0,70	0,0%	1,1%	1,89	[10]
G0114	16.04.2020	1885,20	L	50	213,0	2,06	27,97	63,31	76,92	177,3	2,30	15,8%	16,2%	5,54	[10]
G0115	16.04.2020	1885,00	M	95	241,8	3,16	20,32	44,21	54,34	112,8	1,23	12,8%	5,9%	3,74	[10]
G0122	16.04.2020	1884,00	M	258	283,5	7,09	15,84	30,68	36,47	69,9	0,31	0,1%	0,0%	2,08	[10]
G0123	16.04.2020	1884,00	L	200	218,1	4,88	22,65	51,01	59,63	113,7	1,32	11,4%	7,9%	3,23	[10]
G0124	16.04.2020	1883,80	R	269	222,1	16,19	30,34	56,77	65,81	122,0	1,30	2,7%	11,3%	1,87	[10]
G0125	16.04.2020	1883,55	R	225	186,1	7,73	45,46	85,27	98,46	123,0	1,93	8,6%	28,5%	3,32	[10]
G0126	16.04.2020	1883,40	R	228	184,6	17,30	51,99	142,10	155,60	260,0	22,00	2,5%	41,7%	2,87	[10]
G0127	16.04.2020	1883,15	R	195	198,0	10,75	60,65	139,07	153,51	360,0	72,17	5,5%	48,8%	3,60	[10]
G0128	16.04.2020	1883,00	M	146	252,4	8,00	26,46	53,94	60,86	105,5	1,42	4,5%	8,3%	2,60	[10]
G0129	16.04.2020	1882,30	M	209	184,1	4,25	19,07	63,46	73,64	126,7	1,50	7,3%	16,3%	3,86	[10]
G0130	16.04.2020	1882,00	R	258	204,2	7,12	32,00	55,50	61,74	115,9	1,47	8,6%	8,9%	2,79	[10]
G0131	16.04.2020	1882,00	M	197	228,3	2,73	21,96	52,70	60,49	127,9	1,48	13,9%	8,2%	4,39	[10]
G0132	16.04.2020	1882,00	L	137	201,4	2,21	16,33	59,57	71,67	119,4	1,48	15,0%	14,0%	5,19	[10]
G0133	16.04.2020	1881,80	M	178	228,6	7,03	21,79	43,47	50,95	85,9	0,45	2,7%	2,8%	2,49	[10]
G0135	16.04.2020	1881,30	M	133	219,9	5,26	23,63	44,27	51,89	106,6	1,53	10,7%	3,0%	2,90	[10]
G0136	17.04.2020	1881,30	L	40	248,4	5,83	41,12	78,94	86,92	142,0	2,91	7,8%	30,0%	3,68	[10]
G0137	17.04.2020	1881,00	M	73	254,6	3,19	20,30	51,50	61,09	99,5	1,20	12,7%	8,9%	4,02	[10]
G0138	17.04.2020	1880,60	R	137	219,1	2,92	21,25	47,36	55,11	97,3	1,87	13,7%	4,7%	4,03	[10]
G0139	17.04.2020	1880,60	M	76	188,5	2,67	23,31	67,55	78,10	143,9	1,15	12,8%	18,9%	5,03	[10]
G0140	17.04.2020	1880,60	L	25	182,9	25,54	43,28	61,59	69,47	102,8	0,79	0,4%	13,8%	1,55	[10]
G0141	17.04.2020	1880,00	R	130	230,0	7,33	15,82	28,46	32,39	72,3	0,74	1,7%	0,3%	1,97	[10]
G0142	17.04.2020	1880,00	M	76	241,9	12,04	20,80	35,35	40,21	90,8	0,62	0,1%	0,2%	1,71	[10]
G0144	17.04.2020	1879,50	M	133	223,8	6,77	27,41	52,56	59,21	109,5	1,22	7,6%	6,9%	2,79	[10]
G0145	17.04.2020	1879,00	M	184	228,4	7,25	24,75	46,69	54,29	93,0	0,78	6,7%	4,1%	2,54	[10]
G0146	17.04.2020	1878,00	R	270	237,8	9,68	21,05	43,73	51,57	94,8	1,89	0,5%	2,9%	2,13	[10]
G0147	17.04.2020	1878,00	M	224	214,0	5,39	22,40	59,49	72,50	125,6	1,27	7,7%	14,1%	3,32	[10]
G0148	17.04.2020	1878,00	L	179	216,3	11,36	27,37	46,05	53,17	91,3	1,17	4,1%	2,9%	2,01	[10]
G0149	17.04.2020	1877,00	M	117	247,8	3,16	14,03	40,33	53,37	212,6	4,23	12,4%	6,7%	3,57	[10]
G0150	17.04.2020	1876,00	R	148	228,0	5,15	15,22	28,93	33,98	81,3	0,65	7,3%	0,5%	2,37	[10]
G0151	17.04.2020	1876,00	M	87	252,6	3,66	16,56	37,88	43,93	89,5	1,05	11,9%	2,4%	3,22	[10]
G0153	17.04.2020	1875,50	M	171	264,7	3,31	15,78	34,34	40,47	92,9	0,61	12,8%	1,2%	3,22	[10]

G0154	17.04.2020	1875,00	M	225	186,7	0,39	14,75	29,71	35,37	91,1	0,59	23,0%	0,3%	8,69	[10]
G0155	17.04.2020	1874,00	R	245	207,6	33,49	48,55	68,99	77,01	124,9	0,99	1,1%	21,0%	**1,44**	[10]
G0156	17.04.2020	1874,00	M	186	245,4	13,61	25,50	42,56	48,73	88,9	1,14	0,5%	1,6%	1,77	[10]
G0157	17.04.2020	1874,00	L	126	258,0	3,37	14,88	32,29	39,04	82,3	0,77	10,5%	0,7%	3,09	[10]
G0158	17.04.2020	1873,00	R	189	268,2	11,59	29,78	49,08	55,20	98,7	0,24	4,8%	3,2%	2,06	[10]
G0159	17.04.2020	1873,00	M	129	202,0	2,10	16,10	50,13	57,82	108,9	1,11	15,2%	6,4%	4,89	[10]
G0160	17.04.2020	1873,00	L	69	210,5	1,50	17,55	51,66	59,12	100,8	0,81	18,4%	7,2%	5,87	[10]
	2. Entnahmekampagne:														
G1022	19.10.2020	1912,00	R	203	218,4	3,21	19,85	49,33	58,03	107,3	3,04	12,6%	7,0%	3,92	[10]
G1023	19.10.2020	1912,00	M	142	232,9	4,72	25,29	50,32	56,69	96,3	1,26	7,9%	4,7%	3,26	[10]
G1024	19.10.2020	1912,00	L	82	216,8	2,10	24,54	54,70	63,37	110,7	1,39	15,5%	10,1%	5,11	[10]
G1029	19.10.2020	1909,55	L	30	203,8	3,66	19,89	56,93	70,35	113,8	0,81	10,9%	13,0%	3,94	[10]
G1030	19.10.2020	1909,15	L	20	214,3	10,87	28,10	50,38	55,99	114,0	1,81	5,1%	3,3%	2,15	[10]
G1037	19.10.2020	1907,85	L	230	189,4	3,35	27,31	51,36	59,86	117,9	1,18	13,3%	8,0%	3,92	[10]
G1038	19.10.2020	1907,75	L	215	194,6	6,09	25,90	52,47	62,01	104,6	1,62	8,3%	9,4%	2,93	[10]
G1041	19.10.2020	1906,45	L	25	170,2	5,53	22,35	41,57	49,01	111,8	1,08	7,9%	4,3%	2,74	[10]
G1050	19.10.2020	1904,00	R	346	245,1	2,13	18,48	40,47	45,90	85,7	0,54	15,3%	1,1%	4,36	[10]
G1051	19.10.2020	1904,00	M	285	209,8	5,39	19,54	44,30	54,97	101,4	1,32	4,2%	6,3%	2,87	[10]
G1052	19.10.2020	1904,00	L	225	226,9	3,10	19,49	43,22	50,90	93,3	0,56	11,9%	2,9%	3,73	[10]
G1057	19.10.2020	1901,00	M	184	223,9	2,07	16,35	47,40	58,39	106,7	1,55	15,6%	7,8%	4,78	[10]
G1062	19.10.2020	1899,00	M	123	199,4	6,83	15,24	33,82	40,41	84,7	0,76	0,3%	0,4%	2,23	[10]
G1067	19.10.2020	1897,00	M	208	299,2	1,07	19,32	55,99	67,97	136,2	1,44	22,1%	12,0%	7,23	[10]
G1078	19.10.2020	1894,00	R	278	230,0	9,96	26,27	50,03	57,86	118,6	1,84	5,6%	6,5%	2,24	[10]
G1079	19.10.2020	1894,00	M	217	209,0	2,32	17,48	42,43	51,81	130,7	2,49	14,7%	4,5%	4,27	[10]
G1080	19.10.2020	1894,00	L	157	182,4	1,54	20,29	49,76	58,64	106,6	1,60	18,2%	7,4%	5,68	[10]
G1083	19.10.2020	1892,70	M	252	212,7	7,50	14,34	28,81	37,33	112,6	1,19	2,3%	2,3%	1,96	[10]
G1084	19.10.2020	1892,30	M	215	177,0	2,79	21,51	55,18	64,10	122,7	2,02	13,1%	10,4%	4,45	[10]
G1098	20.10.2020	1888,45	M	150	216,5	0,51	17,62	58,95	70,37	122,2	3,14	22,3%	13,6%	10,76	[10]
G1099	20.10.2020	1888,30	M	133	186,4	7,00	21,02	41,97	49,50	92,6	1,47	0,9%	2,4%	2,45	[10]
G1100	20.10.2020	1888,15	M	155	247,1	8,22	18,77	34,99	40,25	72,7	0,15	0,2%	0,0%	2,06	[10]
G1101	20.10.2020	1888,00	R	217	240,9	11,68	26,40	46,89	55,76	106,8	1,51	1,8%	5,8%	2,00	[10]
G1102	20.10.2020	1888,00	M	162	223,4	2,56	11,92	24,41	28,89	86,6	0,42	14,5%	0,2%	3,09	[10]
G1103	20.10.2020	1888,00	L	107	214,6	2,42	12,92	31,85	40,24	94,0	0,61	14,7%	1,3%	3,62	[10]
G1106	20.10.2020	1887,40	M	168	246,1	1,43	18,72	41,52	52,42	102,4	1,15	16,9%	6,1%	5,39	[10]
G1107	20.10.2020	1887,00	M	244	199,7	5,48	18,09	33,39	39,15	84,0	0,52	5,2%	0,6%	2,47	[10]
G1108	20.10.2020	1886,40	M	216	193,5	3,06	13,23	30,67	38,31	98,0	0,85	11,8%	1,5%	3,17	[10]
G1110	20.10.2020	1886,00	M	191	214,5	4,66	16,32	42,28	52,53	103,6	0,97	9,3%	5,2%	3,01	[10]
G1117	20.10.2020	1884,70	M	107	322,3	2,72	19,14	46,55	54,01	102,5	0,90	13,1%	3,8%	4,14	[10]
G1118	20.10.2020	1884,55	M	130	230,7	1,11	14,09	45,20	54,00	123,8	0,71	21,0%	4,8%	6,38	[10]

G1121	20.10.2020	1884,00	R	317	192,2	5,21	29,89	96,49	111,61	153,7	2,99	7,8%	28,7%	4,30	[10]
G1122	20.10.2020	1884,00	M	258	196,7	4,40	15,94	32,48	39,68	91,2	0,62	11,0%	1,7%	2,72	[10]
G1123	20.10.2020	1884,00	L	200	170,9	4,25	22,66	45,92	53,91	91,7	0,74	11,4%	4,2%	3,29	[10]
G1125	20.10.2020	1883,55	R	225	184,4	19,75	36,12	59,97	69,95	126,4	1,47	3,2%	13,2%	1,74	[10]
G1130	20.10.2020	1882,00	R	258	244,1	5,19	30,26	56,38	62,58	103,3	1,14	11,1%	9,6%	3,30	[10]
G1131	20.10.2020	1882,00	M	197	259,8	1,15	21,34	67,92	76,26	113,5	2,29	20,0%	19,9%	7,68	[10]
G1132	20.10.2020	1882,00	L	137	270,9	1,58	18,61	58,83	70,58	118,5	3,39	18,7%	13,7%	6,11	[10]
G1133	20.10.2020	1881,80	M	178	245,9	2,24	16,15	50,50	59,17	95,7	0,77	14,9%	7,6%	4,75	[10]
G1142	20.10.2020	1880,00	M	76	218,4	2,87	17,95	44,15	51,91	87,6	0,53	10,2%	3,2%	3,92	[10]
G1147	20.10.2020	1878,00	M	224	201,9	1,19	17,53	46,00	57,46	100,7	1,01	20,7%	7,5%	6,21	[10]
G1151	20.10.2020	1876,00	M	87	215,4	4,52	18,90	39,08	45,75	90,0	0,49	11,7%	1,3%	2,94	[10]

Daten-Quellen:

[9] Ingenieurbüro Zottl & Erber (1987)
[10] BOKU, IWA & Ingenieurbüro Klasz (2022)

Daten zu den Tracerversuchen (unterschiedliche Korngrössen)

Werte aus Fachliteratur

Parameter:

Dt(i)	Korndurchmesser der Tracersteine (bzw. Zugabematerial)
V(i)	mittlere Wandergeschwindigkeit der Körner (virtuelle Geschwindigkeit)
Db(i)	mittlerer Korndurchmesser des Bettmaterials
V*(i)	dimensionslose Partikelgeschwindigkeit nach Ferguson et al. (2002)
D*(i)	dimensionslose Korndurchmesser nach Ferguson et al. (2002)

Fluss:	Fraktion:	Dt(i) = [mm]	V(i) = [m/d]	Db(i) = [mm]	V*(i) = [-]	D*(i) = [-]	Quelle: [Text]
Donau	Einzelsteine	27,5	10,6	25	0,00024	1,10	[11]
Donau	Einzelsteine	40	7,7	25	0,00014	1,60	[11]
Donau	Einzelsteine	70	6,2	25	0,00009	2,80	[11]
Oberrhein	4 / 8	5,66	14,78	23,5	0,00073	0,24	[12, 13, 14]
Oberrhein	8 / 16	11,31	14,78	23,5	0,00051	0,48	[12, 13, 14]
Oberrhein	16 / 31,5	22,45	11,50	23,5	0,00028	0,96	[12, 13, 14]
Oberrhein	31,5 / 45	37,65	8,76	23,5	0,00017	1,60	[12, 13, 14]
Oberrhein	45 / 63	53,24	6,02	23,5	0,00010	2,27	[12, 13, 14]
Elbe	2 / 6,3	3,55	11,50	12,5	0,00071	0,28	[15, 16]
Elbe	6,3 / 20	11,22	10,95	12,5	0,00038	0,90	[15, 16]
Elbe	20 / 63	35,50	6,57	12,5	0,00013	2,84	[15, 16]

Daten-Quellen:

[11]	Liedermann et al. (2012)
[12]	Gölz (2002); Anm.: Werte nur graphisch ablesbar
[13]	Promny et al. (2010); Anm.: Werte geringfügig höher / tiefer als bei Gölz (2002); diese Werte für obige Tab. verwendet
[14]	Felkel (1972); Anm.: nur für die Db
[15]	Faulhaber et al. (2001)
[16]	Gabriel et al. (2009)

Herausgeber: Nationalpark Donau-Auen GmbH

Titelbild: Gerhard Klasz

Für den Inhalt sind die Autoren verantwortlich. Für den privaten Gebrauch beliebig zu vervielfältigen. Nutzungsrechte der wissenschaftlichen Daten verbleiben beim Auftraggeber (Nationalpark Donau-Auen GmbH) bzw. bei dem Studienautor.

Als pdf-Datei direkt zu beziehen unter www.donauauen.at

Bei Vervielfältigung sind Titel und Herausgeber zu nennen / any reproduction in full or part of this publication must mention the title and credit the publisher as the copyright owner:
© Nationalpark Donau-Auen GmbH

Zitiervorschlag: Klasz, G. (2026) Geschiebebewirtschaftung in der Donau östlich von Wien: Geschieberückführungen aus dem unteren Teil der Strecke und zusammenhängende methodische Fragen. Wissenschaftliche Reihe Nationalpark Donau-Auen, Heft 109





Nationalpark Donau-Auen GmbH
A-2304 Orth/Donau, Schloss Orth
Tel. 02212/3450, Fax DW 17
nationalpark@donauauen.at, www.donauauen.at

Nationalpark Donau Auen
FREIER FLUSS. WILDER WALD.