


# Bedeutung des Sedimenttransportes für den Hochwasserschutz und die Schifffahrt an der österreichischen Donau

Basierend auf der Sedimentbilanz an der österreichischen Donau

Auftraggeber: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt,  
Energie, Mobilität,  
Innovation und Technologie (BMK)

 Bundesministerium  
Klimaschutz, Umwelt,  
Energie, Mobilität,  
Innovation und Technologie

Auftragnehmer: Universität für Bodenkultur Wien (BOKU)  
Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt (WAU)  
Institut für Wasserbau, Hydraulik und  
Fließgewässerforschung (IWA)



Autoren: H. Habersack, M. Haimann, M. Krapesch, Ph. Gmeiner  
Wien, 2021

Zitiervorschlag:

Habersack H., Haimann M., Krapesch M., Gmeiner Ph. (2021). Bedeutung des Sedimenttransportes für den Hochwasserschutz und die Schifffahrt an der österreichischen Donau. Endbericht. Universität für Bodenkultur Wien.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Problemstellung	5
1.2	Zielsetzung	6
2	Kurzbeschreibung der österreichischen Donau	7
3	Ergebnisse	14
3.1	Sedimenttransport	14
3.1.1	Messstellen und Datengrundlage	14
3.1.2	Schwebstofftransport	27
3.1.3	Geschiebetransport	33
3.1.4	Einfluss von Hochwasserereignissen	35
3.2	Sedimentbilanzanalyse	38
3.2.1	Sohlgrundentwicklung	39
3.2.2	Baggerungen und Verklappungen	65
3.2.3	Vorlandverlandung	68
3.2.4	Sedimentbilanz	69
3.3	Maßnahmen aus Sicht des Hochwasserschutzes und der Schifffahrt	75
3.3.1	Hochwasserschutz	76
3.3.2	Schifffahrt	83
4	Grenzüberschreitende Betrachtung	89
4.1	Flussmorphologische Veränderung	89
4.2	Sohlentwicklung	91
4.3	Feststofftransport	92
4.3.1	Schwebstofftransport	92
4.3.2	Geschiebetransport	94
4.4	Baggerungen und Materialzugaben	95
4.5	Korngrößen	97
4.6	Sedimentbilanz	99
4.7	Significant Water Management Issue	100
5	Zusammenfassung und Empfehlungen	103
6	Literatur	108
7	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	117
7.1	Abbildungsverzeichnis	117
7.2	Tabellenverzeichnis	123

## Abkürzungsverzeichnis

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
ADV	Acoustic Doppler Velocimeter
BfG	Bundesamt für Gewässerkunde
BMLFUW	Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft
BMNT	Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus
BOKU	Universität für Bodenkultur Wien
$D_{XX}$	Charakteristischer Korndurchmesser bei XX % Massedurchgang
$D_m$	mittlerer Korndurchmesser nach Meyer-Peter und Müller (arithmetisches Mittel)
$D_{max}$	maximaler Korndurchmesser
$\Delta S$	Sohlhöhenänderung.
EU	Europäische Union
$FMRB_{min}$	minimale flussmorphologische Raumbedarf
HD	Hydrographischer Dienst
HQ <sub>1</sub>	1-jährliches Hochwasser
HQ <sub>10</sub>	10-jährliches Hochwasser
HQ <sub>200</sub>	200-jährliches Hochwasser
HW	Hochwasser
HZB	Hydrographisches Zentralbüro
$I_a$	künstliche Sedimentzufuhr
$I_t$	Sedimenteintrag von Zubringern
$I_u$	Sedimenteintrag von flussauf
IWA	Institut für Wasserbau, Hydraulik und Fließgewässerforschung
KGV	Korngrößenverteilung
KW	Kraftwerk
$O_a$	Abrasion
$O_d$	Sedimentaustrag nach flussab
$O_{dr}$	Sedimententnahme durch Baggerungen
$O_f$	Sedimentation an Überflutungsflächen
$O_g$	Sedimentablagerungen in den Bühnenfeldern
$Q_s$	Schwebstofftransport
$s_0$	Schwebstoffkonzentration
$V_s$	Schwebstofffracht
$V'_{s,m}$	spezifische Schwebstofffracht
VHP	Verbund Hydro Power
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

## 1 Einleitung

Flüsse sind Lebensader für Mensch und Natur und sollen als solche einer Vielzahl an Ansprüchen gerecht werden. Sie unterstützen die Trinkwasserversorgung, dienen dem Tourismus, der lokalen Erholung, liefern Energie und Ökosystemdienstleistungen und sind für die natürliche Umwelt unerlässlich.

Die Variabilität von Abflüssen ist ein wichtiges Merkmal von Flusssystemen mit Auswirkungen auf die Geomorphologie, die Ökologie und die menschliche Nutzung (Puckridge et al., 1998). Hochwässer sind dabei natürliche Ereignisse, jedoch kann deren Auftreten verstärkt durch die intensive Nutzung der Fließgewässer und der an sie angrenzenden Naturräume und Lebensräume katastrophale Auswirkungen haben und zu großflächigen Schäden führen.

Um die Donau bzw. die an sie angrenzenden Naturräume und Lebensräume besser nutzen und sich besser vor Hochwässern schützen zu können, wurden diese schrittweise für den Hochwasserschutz aber auch für die Schifffahrt und für die Wasserkraft reguliert (Habersack et al., 2016). Als Folge verändert sich das Sedimentregime wobei Kontinuumsunterbrechungen wie Sperrbauwerke, Wehranlagen und Stauhaltungen von Wasserkraftwerken oftmals zu einem unausgeglichene Feststoffhaushalt führen. Durch die reduzierte Gewässerbreite und das erhöhte Gefälle durch Begradigung des Gerinnes wird zusätzlich die Sedimenttransportkapazität des Flusses erhöht (Habersack et al., 2012). Aus wasserbaulicher und ökologischer Sicht sind die Sedimentdurchgängigkeit von Flüssen sowie ein intakter Feststoffhaushalt bedeutende Themenfelder für eine nachhaltige Bewirtschaftung unserer Fließgewässer.

In der Literatur finden sich viele Beispiele für Sedimentbilanzen auf der Einzugsgebietsskala eines Fließgewässers, bei denen Bodenerosion, der Transport von Sedimenten hangabwärts, Zwischenspeicherungen am Hang und der Eintrag ins Gewässer bilanziert werden (Reid & Dunne 1996; Hinderer, 2012; Hoffmann, 2015). Der Transport im Gewässer wird häufig vernachlässigt oder unzureichend betrachtet.

Auf Schwebstoffe entfällt zwar der größte Masseanteil des Feststofftransportes, jedoch ist es vor allem der Transport größerer Fraktionen, welcher die flussmorphologische Ausgestaltung in Kiesbettflüssen maßgeblich bestimmt. Gerade während Extremereignissen finden die intensivsten Transportprozesse in Flüssen statt (Karimae Tabarestani & Zarrati, 2014) und bedeutende morphologische Veränderungen können auftreten (Eaton & Lapointe, 2001).

### 1.1 Problemstellung

Sowohl ein Sedimentüberschuss als auch ein Defizit an Sedimenten können zur Verstärkung des Hochwasserrisikos und zur Beeinträchtigung der Schifffahrt beitragen. Daher spielt die Wiederherstellung des Sedimentkontinuums und der gewässertypischen Morphodynamik in der Verringerung des Hochwasserrisikos und zum Erhalt guter Schifffahrtsbedingungen eine große Rolle. Das Erkennen negativer Trends im Feststoffhaushalt, die Erfassung der Wirkung von Bauwerken, Landnutzungsänderungen etc. sollten eine Grundlage liefern, um Maßnahmen für ein nachhaltiges Sedimentmanagement ergreifen zu können. Im Rahmen solcher Überlegungen soll gleichzeitig das Überschussproblem in den Rückhalteräumen verringert bzw. das Defizit in den freien Fließstrecken minimiert werden. Die Erstellung einer Sedimentbilanz ist daher notwendig, um Problembereiche

aufzuzeigen, das Prozessverständnis zu verbessern und basierend darauf nachhaltige Sedimentmanagementstrategien entwickeln zu können.

Zur Bestimmung des Sedimenthaushalts werden meist Sohlgrundaufnahmen, manchmal in Kombination mit Geschiebe- und Schwebstoffmessungen, betrachtet. Diese Messungen geben jedoch keine Antwort auf wesentliche Fragestellungen wie: „Woher stammen die Sedimentfrachten?“, „Was passiert mit den erodierten Sedimenten?“, und „Wie sind die morphologischen Prozesse in den Bereichen unterstrom und oberstrom miteinander verknüpft?“. Die Beantwortung dieser Fragen ist unabdingbar für das Verständnis der Flussmorphologie, für die Prognose zukünftiger Erosions- und Sedimentationsprozesse und um die Auswirkungen menschlicher Einflüsse zu verstehen. Sie ist außerdem relevant für die Optimierung von Geschiebezugabe- und Baggerstrategien sowie Fließgewässer-, Stauraum- und Wasserstraßenmanagement. Sediment- oder Feststoffbilanzen beschreiben das Gleichgewicht zwischen den Sedimentmengen, die in das Untersuchungsgebiet eingetragen werden, den Sedimentmengen, die aus dem Untersuchungsgebiet ausgetragen werden, und der Veränderung der Sedimentmengen (Quellen und Senken), die im Untersuchungsgebiet gespeichert sind. Sedimentbilanzen sind somit geeignet, die oben aufgeworfenen Fragen nach Transportpfaden sowie den Quellen und Senken des Sedimentes zu beantworten und daraus passende Managementmaßnahmen zu entwickeln. Eine Sedimentbilanzierung liefert darüber hinaus Informationen über morphologische Zusammenhänge verschiedener Flussabschnitte.

## 1.2 Zielsetzung

Der Fokus dieser Studie liegt auf der Analyse der sedimentrelevanten Prozesse im Gewässer. Dabei werden die Sedimenttransportdaten zusammengestellt und gemeinsam mit der Sohlhöhenänderung aus den Sohlvermessungen (von viadonau und Verbund) analysiert. Soweit Daten über Sedimententnahmen (Baggerungen) und Sedimentzugaben (Verklappungen) und Daten zur Sedimentation an Überflutungsflächen vorhanden sind, werden diese ebenfalls in die Betrachtung miteinbezogen. Die Hauptzielsetzung des Forschungsprojektes ist die Erstellung eines Beitrags zur Sedimentbilanz für die österreichische Donau als Basis für die Entwicklung von Maßnahmen des Sedimentmanagements die der Verringerung des Hochwasserrisikos und der Verbesserung des Hochwasserschutzes und der Schifffahrt dienen.

Das Projekt soll daher eine Übersicht über das Monitoring des Sedimenttransportes an der Donau in Österreich geben. Anhand von Messdaten sollen die Sedimenttransportprozesse - auch im Zusammenhang mit Hochwasserereignissen - und Veränderungen der Morphologie beschrieben werden und Strategien aufgezeigt werden, um den Umgang mit Sedimenten im Zusammenhang mit Hochwasserschutz und Schifffahrt zu verbessern.

Darüber hinaus soll der Sedimenthaushalt der österreichischen Donau in einen übergeordneten Kontext gebracht werden, indem die Sedimentbilanz an der gesamten Donau grenzüberschreitend betrachtet wird.

## 2 Kurzbeschreibung der österreichischen Donau

Die österreichische Donau ist ein alpiner Fluss mit einer Länge vom 350,5 km. In etwa 96% bzw. 80.565 km<sup>2</sup> des österreichischen Staatsgebietes tragen zum gesamten Donaueinzugsgebiet von 801.463 km<sup>2</sup> bei, wobei der Anteil am Gesamtabfluss in das Schwarze Meer ungefähr 25% beträgt (BMLFUW, 2017a). Der österreichische Abschnitt beginnt an der Grenze zu Deutschland (Strom-km 2223,2), gefolgt von der deutsch-österreichischen Grenzstrecke (Strom-km 2223,2 bis Strom-km 2201,77). Der Grenzabschnitt zwischen Österreich und Slowakei erstreckt sich zwischen Strom-km 1880,1 und Strom-km 1872,7. Auf dem Weg durch Österreich überwindet die Donau einen Höhenunterschied von etwa 157,3 m (bei mittlerem Wasserstand), mit einem durchschnittlichen Gefälle von etwa 0,45 ‰. Die großen alpinen Donauzubringer Inn, Enns und Traun bestimmen das hydrologische Regime der österreichischen Donau. Beeinflusst durch diese alpinen Flüsse und infolge der Schneeschmelze, treten an der österreichischen Donau die maximalen Abflüsse im Frühjahr/Sommer auf (Mader et al., 1996). Mit einem mittleren Jahresabfluss von 728 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (Pegel Schärding) trägt der Inn am meisten zum Abflussgeschehen der Oberen Donau bei, wobei der mittlere Jahresabfluss etwas höher ist als jener der Donau selbst vor Einmündung des Inns. Die Enns hat einen mittleren Jahresabfluss von 204 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (Pegel Steyr (Ortskai)) und die Traun von 130 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (Pegel Wels-Lichtenegg) (BMNT, 2018a). Der hohe Geschiebe- und Schwebstoffeintrag des Inn hatte in der Vergangenheit und hat noch immer - in Bezug auf den Schwebstofftransport - einen starken Einfluss auf das Sedimentregime der österreichischen Donau.

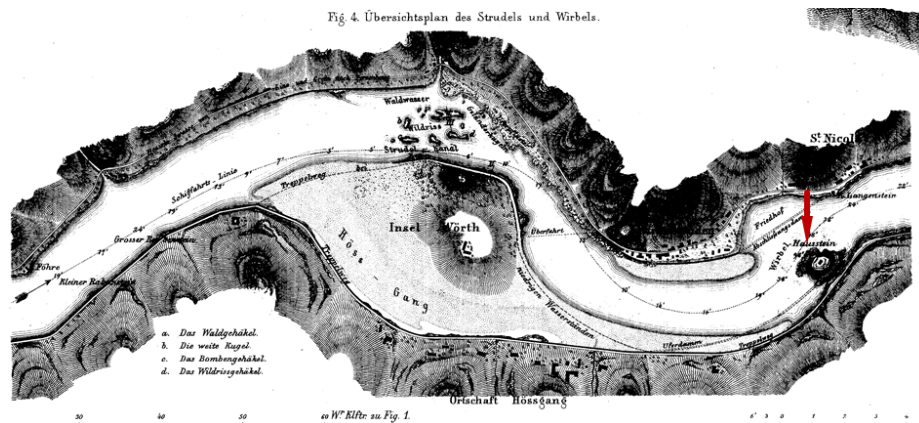
Aus geomorphologischer Sicht ist die Donau in Österreich gekennzeichnet durch Bereiche mit engen, eingeschnittenen Durchbruchstätern und durch Abschnitte mit größeren Flussbreiten in den Beckenlagen, in denen die Donau durch das postglaziale Alluvium fließt (Abbildung 1). Darüber hinaus gibt es mehrere sehr kurze Durchbruchsbereiche wie z.B. die Linzer Pforte oder die Wiener Pforte wo die Donau das Voralpengebiet durchschneidet, sowie die Thebener Pforte an der österreichisch-slowakischen Grenze.



Abbildung 1. Überblick der Durchbruchsstrecken (rote Linien) und der Beckenstrecken (grüne Linien). Modifiziert nach Radler et al. (1993) und Schmautz et al. (2000).

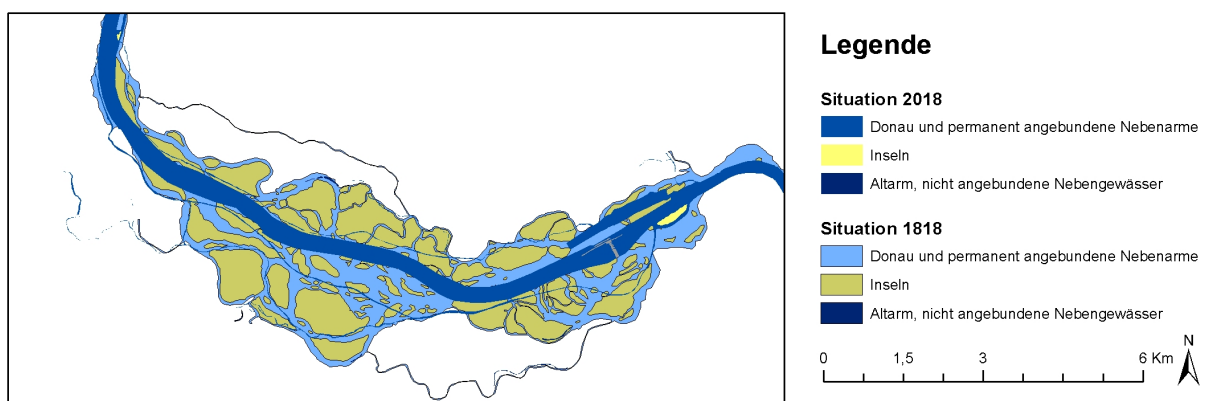
Die beiden primären Prozesse, die es der Donau ermöglichten, in das harte kristalline Gestein des Böhmisches Massivs einzudringen, waren Epigenese (die Donau war bereits fixiert und erodierte langsam in dieses Gestein) und eine langsame lokale tektonische Hebung (Jungwirth et al., 2014).

Eine der auffälligsten Merkmale in diesem Zusammenhang ist die Schlägener Schlinge (ein eingeschnittener Doppelmäander) im engen Tal zwischen Jochenstein und Aschach. Im Strudengau befindet sich das engste Durchbruchstal der österreichischen Donau und stellte für die Schifffahrt einen gefährlichen Abschnitt in historischer Zeit dar bzw. ist bis heute ein anspruchsvoller Abschnitt für die Binnenschifffahrt (Abbildung 2).



**Abbildung 2. Historische Karte des Strudengaus (Strom-km 2078 - 2075) aus dem Jahr 1771. Die Insel Wörth teilt die Donau in den Hössgang (rechter Arm) und den Strudenkanal (linker Arm). Der rote Pfeil markiert den Hausstein (Baumgartner, 1860).**

Während die Beckenabschnitte mit quartären Sedimenten gefüllt waren und einer Vielzahl von morphologischen Prozessen unterworfen waren, fungierten die Abschnitte in den engen Tälern aufgrund der natürlich begrenzten Flussbreite eher als Sedimenttransferzone. Nach Hohensinner et al. (2016) weisen die alluvialen Abschnitte der Donau in Österreich vor Beginn der systematischen Regulierung in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts Elemente eines verzweigten als auch eines gewunden-mäandrierenden Flusstyps mit Nebenarmen auf. Meist hatte die Donau ein oder zwei dominante Hauptarme, mehrere kleinere Nebenarme sowie Kiesbänke und -inseln an den Gleituferrn aber auch in Flussmitte (sog. Mitterhaufen) mit einer zum Teil starken Morphodynamik (Abbildung 3).



**Abbildung 3. Eferdinger Becken (Strom-km 2159 - 2144): Situation im Jahr 1818 (Franziseische Landesaufnahme) bzw. 2018.**

Der Übergang zwischen den breiteren Beckenstrecken und den Durchbruchstrecken wird durch Rückstauereffekte während der Hochwasserphase (stärkere Wirkung vor der Regulierung) sowie aufgrund der reduzierten Durchflusskapazität der Donau beim Eintritt in die engen Täler beeinflusst



(Haidvogel et al., 2003). Diese Rückstauereffekte waren auch für die Ablagerung von Kies und Feinmaterial in der umgebenden Flusslandschaft verantwortlich. Je nach Charakteristik der stromab gelegenen Engstellen, fanden aufgrund des Durchflusses und der Sedimentzufuhr unterschiedliche Sedimentations- und Erosionsprozesse statt (Jungwirth et al., 2014).

In den Durchbruchsstrecken bzw. knapp stromab davon war das Flussbett teilweise durch große Felsblöcke (sogenannte "Kugeln") mit einem Volumen von bis zu 2 m<sup>3</sup> gekennzeichnet, die die sogenannten "Kachlets" bildeten (Schmutterer, 1959). Diese "Kachlets" waren Flachwasserabschnitte mit über die Wasseroberfläche hinausragenden Felsen, die manchmal auch kleine Inseln bildeten. Sie stellten für gewöhnlich eine Erosionsbasis dar und waren durch höhere Fließgeschwindigkeiten und ein höheres Gefälle gekennzeichnet. Das Aschacher Kachlet (Abbildung 4, links) beispielsweise hatte ein Gefälle zwischen 2 und 5 ‰, was wesentlich höher war als das durchschnittliche Gefälle von 0,445 ‰ für die österreichische Donau zu dieser Zeit (Schmutterer, 1959). Da sie eine Bedrohung für die Schifffahrt darstellten, wurden die meisten von ihnen mit Spezialgeräten reguliert (z.B. wurden innerhalb von 20 Jahren 30000 Blöcke aus dem Aschacher Kachlet entfernt) (Abbildung 4, rechts).

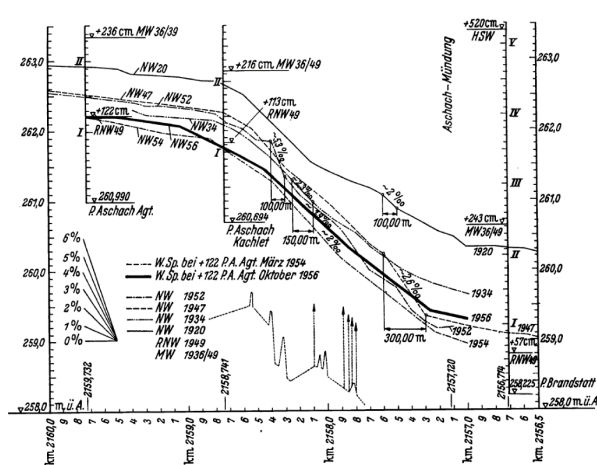


Abb. 8. Regulierung Aschacher Kachlet (Wasserspiegelgefälle)  
 P. A. Agt. = Pegel Aschach Agentie

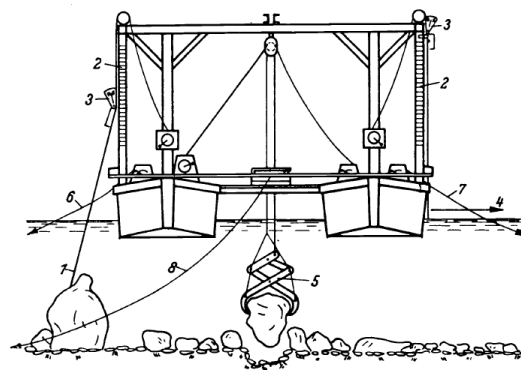


Abb. 7. Sondier-Hebwerk (Systemskizze der Arbeitsweise)  
 1 Sondiergerüst „abgesenkt“. 2 Maßeinteilung für die Rahmenabsenkung. 3 Skala zum Ablesen des „Ausschlages“. 4 Sondiergerüst in „Nullstellung“. 5 Greifzahn, eine „Kugel“ hebend. 6 u. 7 links- und rechtsufrige Lavierketten. 8 Gierseil

**Abbildung 4. Links: Regulierung des Aschacher Kachlet (Wasserspiegelgefälle); rechts: Spezielles Sondier-Hebwerk zur Entfernung der Felsblöcke (Schmutterer, 1959).**

Aus einer historischen Perspektive betrachtet, lässt sich die Entwicklung der österreichischen Donau in Bezug auf die morphologischen Veränderungen und den Sedimenttransport grob in vier Phasen einteilen:

- Vor 1850: Lokale Maßnahmen zum Hochwasserschutz und für die Schifffahrt ohne größeren Einfluss auf die Flussmorphologie; das Sedimentregime (insbesondere Schwebstoffe) könnte sich bereits durch Abholzung / Aufforstung und Landnutzungsänderung verändert haben
- Zwischen 1850 und 1955 / 1958: Systematische Mittel- und Niederwasserregulierung für den Hochwasserschutz und die Binnenschifffahrt auf der österreichischen Donau, die große Veränderungen der Flussmorphologie und des Sedimentregimes bewirkte. Die Mittelwasserregulierung verursachte die größten Veränderungen, mit dem Ergebnis einer Donau, die auf ein einziges Gerinne mit befestigten Ufern eingeschränkt und in einen Zustand ständiger Erosion versetzt wurde; darüber hinaus verringerten die Regulierungstätigkeiten und die Errichtung von Kraftwerken in den Zubringern den Sedimenteintrag in die Donau.

- Zwischen 1955 /1958 und 1997: Bauphase der Kraftwerkskette an der österreichischen Donau, wobei das letzte Kraftwerk Ende 1997 in Betrieb genommen wurde (KW Freudenau).
- Mitte der 1990er Jahre: Das Sedimentmanagement in den beiden freien Fließstrecken änderte sich und man begann die Menge an gebaggerten (elevierten) Sedimenten zu reduzieren und das Geschiebe nach der Baggerung flussaufwärts zu verklappen, u die bettbildenden Sedimente im Flusssystem zu halten. Die Kieszugabe stromab des Kraftwerks Freudenau begann 1996, wobei die Menge des zugegebenen Kieses erst kürzlich erhöht wurde. Die Durchführung von Renaturierungsmaßnahmen begann in den beiden verbleibenden freien Fließstrecken und auch in einigen Stauräumen werden die entnommenen Sedimente zur Schaffung von Schotterbänken und Inseln genutzt.

Bereits im Jahr 1848 waren rund 70% der österreichischen Donau durch Uferverbauung verändert (Schmautz et al., 2000) und nach 1850 fanden die ersten überörtlichen Flussregulierungen in Ober- und Niederösterreich statt. Während vor 1850 die meisten Maßnahmen nicht einem systematischen Regulierungsschema folgten, sondern auf den Schutz von Siedlungen und Ufern vor Hochwasser und Eisgang sowie auf die lokale Verbesserung der Bedingungen für die Binnenschifffahrt abzielten (Tschochner, 1957), begannen nach dieser Zeit die systematischen Mittel- und Niederwasserregulierungen. Nach Schmutterer (1959) war die erste Maßnahme von überörtlicher Bedeutung die Zerstörung (Sprengung) des Haussteins (eines Felsens im Struden) bei Strom-km 2076 in den Jahren 1853 bis 1866. Den Beginn der systematischen Flussregulierung an der Donau in Österreich datiert er mit dem Bau der großen Donauregulierung in Wien (Flusskilometer 1935 bis 1918) in den Jahren 1870 bis 1875. Regulierungen, die die morphologischen Merkmale der Donau in Österreich in großem Maße veränderten, fanden zwischen 1850 und 1860 in Oberösterreich, um 1860 in Wien und um 1880 stromaufwärts und stromabwärts von Wien im Tullnerfeld und Marchfeld statt. Die systematische Mittelwasserregulierung hatte das generelle Ziel, ein einheitliches einarmiges Flussbett zu schaffen, indem Seitenarme abgetrennt, Durchstiche geschaffen sowie Leitwände und Ufersicherungen errichtet wurden (Tschochner, 1957). Ein Beispiel für eine solche Regulierung, bei der ein komplexes Flusssystem in ein einziges Gerinne umgewandelt wird, ist in Abbildung 5 anhand des östlichen Machlands (Strom-km 2094 bis 2084) zu sehen.

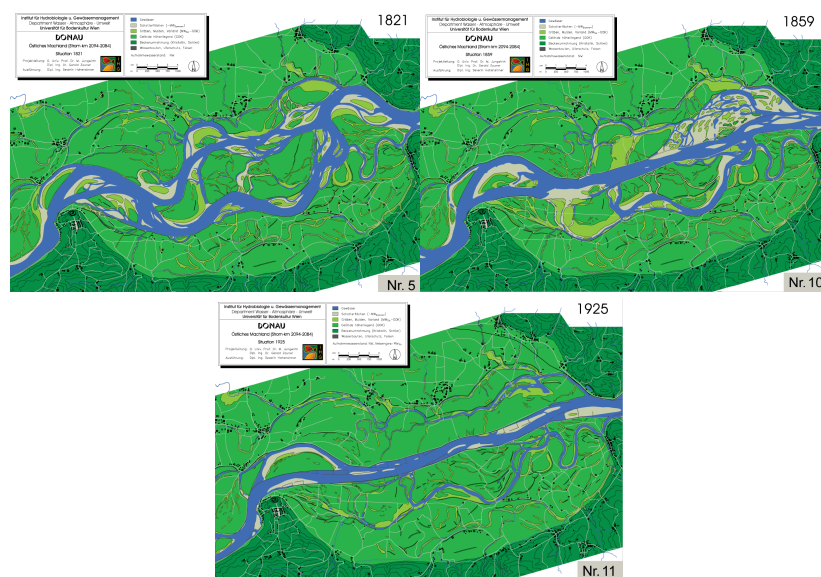


Abbildung 5. Situation im Jahr 1821 vor der Regulierung, im Jahr 1859 nach der intensiven Regulierung der Donau im östlichen Machland und nach Abschluss der Regulierung 1925 aber noch vor Bau der österreichischen Donaukraftwerke (Stromkilometer 2094 - 2084) (Hohensinner, 2008).

Diese Mittelwasserregulierungen erhöhten die Sedimenttransportkapazität in den Becken aufgrund der Breiten- und Längenreduktion der Donau erheblich und versetzten sie in einen Zustand fortwährender Erosion (Schmautz et al., 2000). Zu Beginn des 20. Jahrhunderts waren die meisten Mittelwasserregulierungen fertiggestellt, reichten aber in Bezug auf Fahrwassertiefe und -breite nicht aus, um den Bedürfnissen der Binnenschifffahrt gerecht zu werden (Geitner, 1969). Das Fahrwasser war nicht stabil, sondern pendelte aufgrund wandernder Kiesbänke zwischen den Flussufern und wies viele Seichtstellen auf. Daher wurde Ende des 19. Jahrhunderts mit der Niederwasserregulierung als einer Art Feinregulierung (Geitner, 1969) der bestehenden Regelung begonnen, um Fahrwasserverhältnisse zu schaffen, die für die ständig expandierende Binnenschifffahrt angemessen waren. Bis ins Jahr 1956 waren rund 91 km der österreichischen Donau niederwasserreguliert (Tschochner, 1957).

Im Jahr 1956 wurde mit Jochenstein auch das erste österreichische Donaukraftwerk in Betrieb genommen und mit dem KW Ybbs-Persenbeug ein weiteres fast fertig gestellt (Tschochner, 1957). Die Wasserkraftwerke wurden in rascher Abfolge errichtet mit relativ kurzen Zeitabschnitten mit frei fließenden Abschnitten stromab des jeweiligen Kraftwerkes. Die Verminderung der Geschiebetransportkapazität im Oberlauf der Stauanlagen führt zu einer Sedimentation des Geschiebes und stoppt die Kieszufuhr in die freifließenden Unterliegerstrecken. Neben der gestörten Geschiebezufuhr hatten die Unterwassereintiefungen beim Bau der Kraftwerke einen wesentlichen Einfluss auf die Sohlhöhe und die Menge der Sedimente. Für die Kraftwerke Jochenstein, Ottensheim-Wilhering, Abwinden-Asten, Wallsee-Mitterkirchen, Ybbs-Persenbeug, Melk, Altenwörth und Greifenstein wurden Unterwassereintiefungen auf einer Länge von 5 bis 10 km durchgeführt. Dadurch wurde das Wasserspiegelgefälle in diesen Abschnitten erheblich reduziert. Die Baggerarbeiten für Ybbs-Persenbeug wurden größtenteils nach der Inbetriebnahme des KW Melk durchgeführt, wobei eine große Menge Geröll entfernt wurde. Für die Unterwassereintiefungen der KW Ottensheim-Wilhering, Wallsee-Mitterkirchen, Ybbs-Persenbeug, Melk und Greifenstein wurde teilweise Fels abgetragen. In den Stauräumen der Kraftwerke Abwinden-Asten (nahe der Stadt Linz über 3 km) und Wallsee-Mitterkirchen (Abschnitt Au bis Mauthausen über 4 bis 5 km) wurden Baggerungen zur Absenkung des Sohl-niveaus für den Hochwasserschutz durchgeführt. Nach Inbetriebnahme der Kraftwerke wurde im oberen Bereich des Stauraumes z.B. aus Gründen des Hochwasserschutzes oder der Binnenschifffahrt Kies gebaggert, was zu einer variablen Beeinflussung des Flussbettes, der Erosion und der Ablagerung führte (Prazan, 1990).

Heute fließt die Donau auf ihrem Weg durch Österreich durch eine Kette von zehn Wasserkraftwerken (inklusive dem Grenzkraftwerk Jochenstein) und durch die beiden letzten verbleibenden freien Fließstrecken Wachau und östlich von Wien (Abbildung 6). Rund 78% der Donau in Österreich sind von den Kraftwerken beeinflusst, während nur 22% (oder 77 Strom-km) frei fließende Abschnitte sind (NEWADA duo, 2014). Von diesen zehn Wasserkraftwerken wurden neun zwischen 1955 (KW Jochenstein) und 1984 (KW Greifenstein) in Betrieb genommen, und das KW Freudenaus ging im November 1997 in Vollstau. Die Länge der Stauräume variiert zwischen 16 und 41 km (VHP, 2013b) und die Kraftwerke haben eine Fallhöhe zwischen 9,1 und 15,4 m bei mittlerem Wasserstand (viadonau, 2012). Die von den Stauanlagen beeinflussten Bereiche lassen sich weiter unterteilen in einen zentralen Teil (Wasserspiegelschwankungen zwischen niedrigstem schiffbaren Wasserstand und mittlerem Wasserstand kleiner 0,3 m, ohne Berücksichtigung der Wehrbetriebstoleranz), der rund 197 km ausmacht, und die Stauwurzeln mit einer Länge von 72 km (Zauner et al., 2016), die sich teilweise wie kurze freie Fließstrecken verhalten.

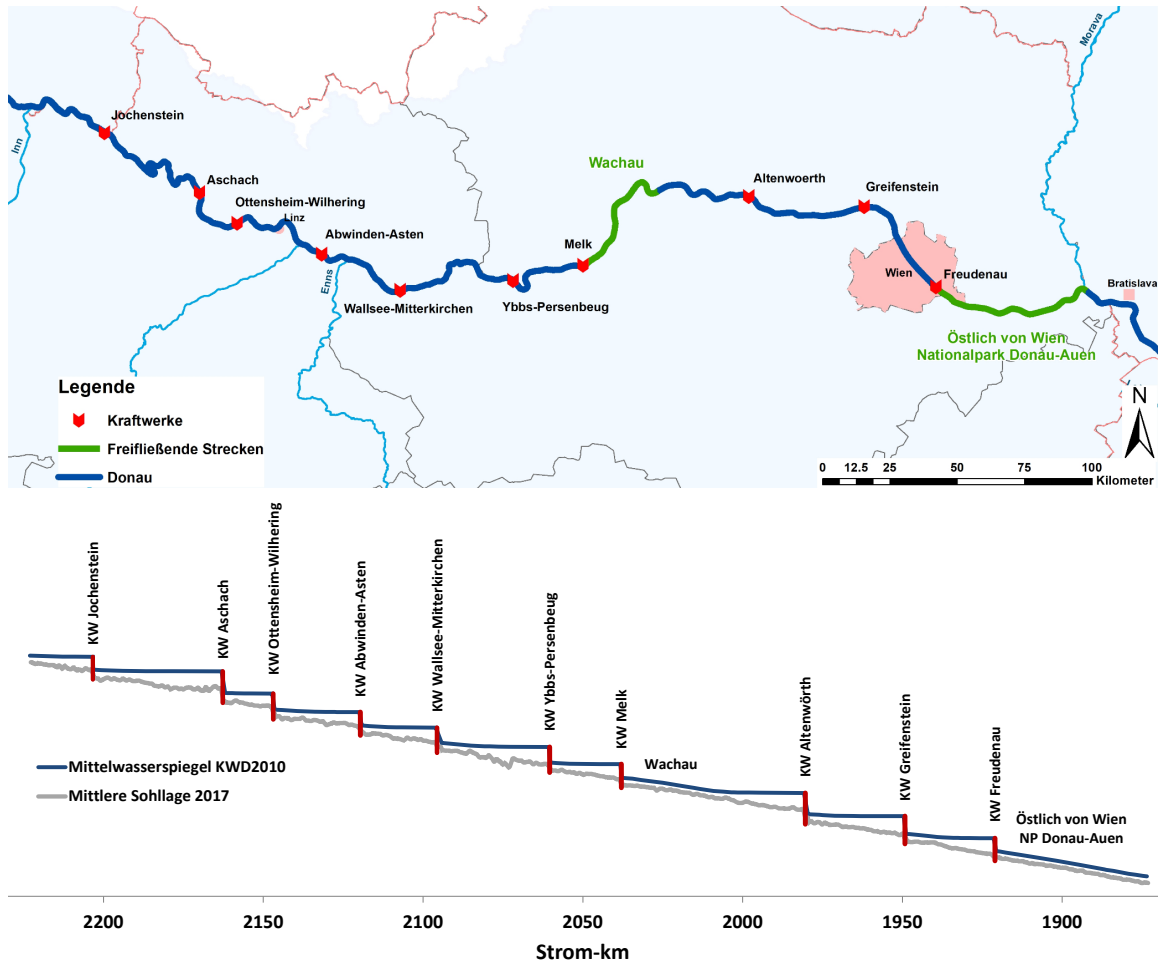


Abbildung 6. Lage der Donaukraftwerke und der freien Fließstrecken an der österreichischen Donau (Datenbasis Sohlhöhen: VHP und viadonau; Wasserstand und Lage der Donaukraftwerke viadonau, 2012).

Durch den Bau etlicher Wasserkraftanlagen in den Nebenflüssen ist der Geschiebeeintrag in die österreichische Donau heute nahe Null. Nach Bauer (1965) war der Geschiebeeintrag aus dem Inn im Jahr 1965 (Inbetriebnahme des KW Passau-Ingling) kleiner als  $10.000 \text{ m}^3/\text{a}$ . Zauner (2001) untersuchte die akkumulierte Sedimentmenge in den fünf Kraftwerken des Unteren Inns und kam zu dem Schluss, dass die Initialphase der Verlandung mit intensiven Sedimentationsprozessen für jedes Kraftwerk etwa 10 Jahre dauerte. Nach etwa 30 Jahren, Anfang der 1970er Jahre, begann sich ein Gleichgewichtszustand zwischen Sedimentation und Erosion einzustellen. Das Gesamtvolumen der abgelagerten Sedimente bis Ende der 1990er Jahre beträgt für diese fünf Stauräume etwa  $80 \text{ Mio. m}^3$ , mit einem relativ hohen Verlandungsgrad (z.B. 57% für das KW Ering).

Die Geschiebezufuhr aus der deutschen Donau wurde mit der Inbetriebnahme des KW Kachlet im Jahr 1927 bei Strom-km 2230,8 endgültig unterbrochen. Die Traunmündung wird durch den Rückstau des KW Abwinden-Asten beeinflusst und das verbleibende Geschiebe wird in einem Geschiebefang aufgefangen. Die Ennsmündung wird durch den Rückstau des KW Wallsee-Mitterkirchen beeinflusst und nach VERBUND (1998) gelangen nach dem Ausbau des Ennshafens, der als zusätzlicher Sedimentfang dient, nur geringe Mengen Kies, wenn überhaupt, in den Stauraum.

Die gesamte Landnutzungsentwicklung in Österreich ist ein weiterer relevanter Faktor für den Sedimenteintrag in die Flüsse. Ab 1830 ist ein deutlicher Trend zur Zunahme von Siedlungen und Waldflächen zu erkennen, während die landwirtschaftlichen Flächen und Grünlandflächen deutlich

zurückgingen (basierend auf veröffentlichten Daten des EU-Projekts Volante). Daher lässt sich die Entwicklung des Sedimentertrags der gesamten Periode nicht ohne weiteres aus der gesamten Landbedeckung ableiten. Auch die Intensität der land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen veränderte sich im Laufe der Zeit (auch die Zunahme der Waldflächen ist nicht gleichmäßig verteilt und kann für die Hügel- und Bergregion als überwiegend angenommen werden). Die intensive Nutzung der verfügbaren Flächen reduzierte die Waldbedeckung in diesen Gebieten auf ein Minimum von 2% im Jahr 1850, bevor die industrielle Revolution den Druck auf die Wälder verringerte (Kaplan, 2009). Seitdem hat sich die Waldbedeckung selbst in den intensiv genutzten Gebieten wieder erholt (der größte Teil des Waldzuwachses beruht auf Aufforstung und Sukzession in verlassenem Land in der Hügel- und Bergregion). Weiters gibt es einen erheblichen Verlust von Grünland, z.B. in Oberösterreich bis heute, durch Umwandlung in Ackerland oder Wald (Eurostat 2015). Summer et al. (1996) bewerteten beispielsweise die Trends der Bodenerosion im alpinen Becken der österreichischen Donau für den Zeitraum 1950 bis 1990 durch die Landwirtschaft. Sie kommen zu dem Schluss, dass der Sedimentertrag in diesem Zeitraum von 40 Jahren um 32% gestiegen ist, mit einem Ertrag von rund 780.000 t/a für 1990. Als einen der Hauptgründe für den signifikanten Anstieg identifizierten Summer et al. (1996) die Ausweitung der Maisproduktion, die zwischen 1950 und 1990 in hügeligen, ungeschützten Gebieten von 4 auf 16% anstieg, was zu starken Erosionsraten führte.

## 3 Ergebnisse

Das Wissen über Sedimenttransport und Änderung der Sohlhöhen sowie in weitere Folge die Sedimentbilanz an der österreichischen Donau stellt eine Grundlage dar, auf deren Basis Maßnahmen zum Sedimentmanagement in Bezug auf Hochwasserschutz und Schifffahrt diskutiert werden können.

### 3.1 Sedimenttransport

Durch die Erhebung und Zusammenführung der vorhandenen Sedimenttransportdaten (sowohl Schwebstoff als auch Geschiebe) an der österreichischen Donau wurden historische Daten (z.B. Gruber, 1969; Nachtnebel et al., 2004) mit den aktuellen Messungen (ehyd) verknüpft und die Veränderung des Sedimenttransportes über die Zeit erhoben und analysiert. Bei der Analyse wurde auch die Rolle der Hochwasserereignisse im Zusammenhang mit dem Sedimenttransport untersucht werden und die Bedeutung der Remobilisierung aus den Stauräumen erfasst.

#### 3.1.1 Messstellen und Datengrundlage

Um sedimentbezogene Prozesse in Flüssen zu verstehen und zu bewerten, ist es von großer Bedeutung die Menge an transportierten Sedimenten, die sowohl zeitlich als auch räumlich variieren kann, zu kennen. Aus diesem Grund werden an charakteristischen Stellen der Donau sowie der Zubringer Messstellen betrieben, wobei zwischen Methoden zur Messung des Schwebstoff- bzw. Geschiebetransports unterschieden wird. Schwebstoffe werden durch die Turbulenz in Schwebelage gehalten und sind in der gesamten Wassersäule verteilt. Der Geschiebetransport findet an der Flusssohle statt, wo größere Partikel rollend, gleitend oder springend fortbewegt werden. In diesem Kapitel werden beide Monitoringmethoden vorgestellt, wobei grundsätzlich festzuhalten ist, dass es im Gegensatz zur relativ hohen Anzahl an Schwebstoffmessstellen, nur wenige Stationen an der Donau gibt, an denen der Geschiebetransport erfasst wird (Abbildung 7).

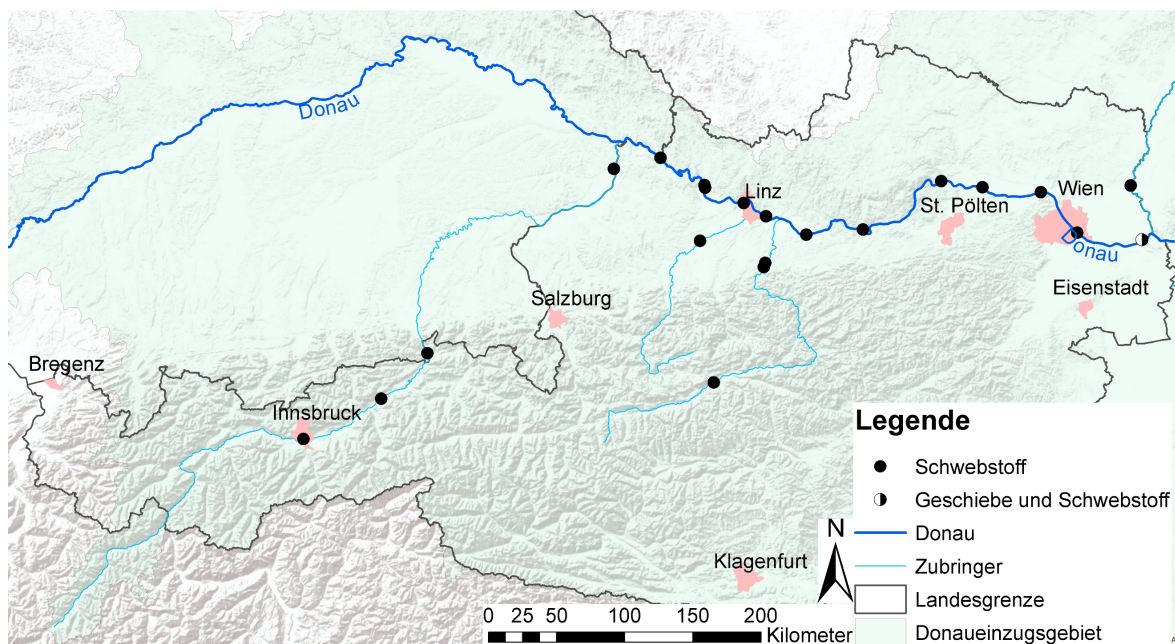


Abbildung 7. Überblick Geschiebe- und Schwebstoffmessstellen an der österreichischen Donau und den wichtigsten österreichischen Donauzubringern.

### 3.1.1.1 Schwebstoffmonitoring

Die Schwebstoffmessstellen an der österreichischen Donau bzw. an den Zubringern, die in Österreich in die Donau münden, sind in Tabelle 1 bzw. Tabelle 2 aufgelistet.

**Tabelle 1. Schwebstoffmessstellen an der österreichischen Donau.**

Messstelle	Lage (Strom-km)	Betreiber	Daten seit	Parameter*
Engelhartzell	2200,66	viadonau	1954	$s_0, Q_s, V_s$
KW Aschach	2161,96	VHP	2000	$s_0, Q_s, V_s$
Aschach Strombauleitung	2161,27	viadonau	1960	$s_0, Q_s, V_s,$
Linz	2135,17	viadonau	1928	$s_0, Q_s, V_s$
KW Abwinden - Asten	2119,20	viadonau VHP	1970 2000	$s_0$
KW Wallsee - Mitterkirchen	2094,21	viadonau VHP	1958 2000	$s_0$
KW Ybbs - Persenbeug	2060,20	viadonau VHP	1958 2000	$s_0$
Stein-Krems	2002,69	viadonau	1991	$s_0, Q_s, V_s$
KW Altenwörth	1979,58	viadonau VHP	1982 2000	$s_0$
KW Greifenstein	1948,88	viadonau VHP	1998 2000	$s_0$
KW Freudenau	1920,67	VHP	2000	$s_0$
Bad Deutsch-Altenburg (Bauleitung)	1886,86	viadonau	1956	$s_0, Q_s, V_s$
Hainburg Straßenbrücke	1886,24	viadonau	2008	$s_0, Q_s, V_s, V'_{s,m}, KGV$

\* Parameter:  $s_0$  = Schwebstoffkonzentration,  $Q_s$  = Schwebstofftransport,  $V_s$  = Schwebstofffracht,  $V'_{s,m}$  = spezifische Schwebstofffracht, KGV = Korngrößenverteilung

**Tabelle 2. Schwebstoffmessstellen an Donauzubringern**

Fluss	Messstelle	Lage (Strom-km)	Betreiber	Daten seit	Parameter
Inn	Innsbruck	298,6	HD Tirol	2003	$s_0, Q_s, V_s, V'_{s,m}, KGV$
Inn	Rattenberg	250,0	HD Tirol	2007	$s_0, Q_s, V_s, V'_{s,m}, KGV$
Inn	Oberaudorf	211,0	HD Tirol	2008	$s_0, Q_s, V_s, V'_{s,m}, KGV$
Inn	Schärding (Schreibpegel)	16,25	HD OÖ	2008	$s_0, Q_s, V_s, V'_{s,m}, KGV$
Traun	Wels-Lichtenegg	33,25	HD OÖ	1960	$s_0, Q_s, V_s, V'_{s,m}, KGV$
Enns	Trautenfels	173,2	HD STMK	2008	$s_0, Q_s, V_s, V'_{s,m}, KGV$
Enns	Jägerberg	33,47	HD OÖ	2017	$s_0, Q_s, V_s, V'_{s,m}, KGV$
Enns	Steyr (Ortskai)	30,88	HD OÖ	1984	$s_0, Q_s, V_s, V'_{s,m}, KGV$

Fluss	Messstelle	Lage (Strom-km)	Betreiber	Daten seit	Parameter
March	Angern	31,89	viadonau	1957	$s_0$ , $Q_s$ , $V_s$

\* Parameter:  $s_0$  = Schwebstoffkonzentration,  $Q_s$  = Schwebstofftransport,  $V_s$  = Schwebstofffracht,  $V'_{s,m}$  = spezifische Schwebstofffracht, KGV = Korngrößenverteilung

### 3.1.1.1.1 Messmethodik

Hinsichtlich der angewandten Methoden zur Messung des Schwebstofftransports werden mehrere verschiedene Techniken eingesetzt. Grundsätzlich wird zwischen direkten (physische Schwebstoffprobe mittels Flasche zur punktintegrierten oder momentanen Entnahme, Pumptrobenentnahme) und indirekten (optische und akustische Sonden) Messverfahren unterschieden. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die wichtigsten Informationen zum Schwebstoffmonitoring an der österreichischen Donau und an den Zubringern.

**Tabelle 3. Informationen zum Schwebstoffmonitoring an der Donau und an den Zubringern.**

Messmethodik	Häufigkeit	Messstellen
Erfassung der Trübung, Kalibrierprobenentnahme,  Vielpunktentnahme, Probenentnahme zur Bestimmung der KGV	kontinuierlich Durchflussabhängig, von 1-2 Mal pro Woche bis zu mehrmals täglich  mehrmals pro Jahr einmal pro Jahr	Hainburg Straßenbrücke, Innsbruck, Oberaudorf, Rattenberg, Schärding (Schreibpegel), Wels- Lichtenegg, Trautenfels, Jägerberg, Steyr (Ortskai),
Erfassung der Trübung (Pump-)Probenentnahme	kontinuierlich Durchflussabhängig, von 3-mal pro Woche bis zu 6-mal täglich	Aschach Strombauleitung, Ybbs-Persenbeug, Angern
Flaschenprobenentnahme, Pumptrobenentnahme	Durchflussabhängig, von 1-mal pro Woche bis zu mehrmals täglich	Engelhartszell, KW Aschach, KW Ottensheim-Wilhering, Linz, KW Abwinden-Asten, KW Wallsee-Mitterkirchen, Stein- Krems, KW Altenwörth, KW Greifenstein, KW Freudenau, Bad Deutsch-Altenburg

Historische Schwebstoffaufzeichnungen liegen an den Messstellen Engelhartszell, Aschach, KW Ottensheim-Wilhering, Linz, KW Abwinden-Asten, KW Wallsee-Mitterkirchen, Stein-Krems, KW Altenwörth, KW Greifenstein, KW Freudenau, Bad Deutsch-Altenburg, Wels-Lichtenegg, Steyr (Ortskai) und Angern vor. Damals wurden einzelne Flaschenproben in unterschiedlichen Intervallen (abhängig vom Wasserstand zwischen einmal alle drei Tage bis zu viermal pro Tag während Hochwasserereignissen) entnommen. An den Messstellen Engelhartszell, Aschach Strombauleitung, Linz, Stein-Krems und Angern wird der Schwebstofftransport auch heute noch so erfasst. Die Probenahme erfolgt dabei mittels einfachen Probenentnahmegesetzen (z.B. mittels einer an einer Teleskopstange befestigten Flasche; Abbildung 8) meist vom Ufer aus in einem Entnahmepunkt des Gewässers. An der Messstelle Aschach Strombauleitung ist zusätzlich eine optische Sonde installiert.





Abbildung 8. Sammler an Teleskopstange mit Einlaufrohr zur Entnahme von Flaschenproben (© BMLFUW 2008, 2017b).

Heutzutage sind die von Verbund betriebenen Messstellen mit Pumpprobennehmern zur Erfassung der Schwebstoffkonzentration ausgestattet (Abbildung 9). An der Messstelle Ybbs-Persenbeug ist zusätzlich eine optische Sonde installiert.



Abbildung 9. Automatisierter Pumpprobennehmer (© VERBUND). Messstelle an einem VERBUND Kraftwerk (© Verbund)

An den übrigen Messstellen erfolgt die Datenerhebung und -auswertung heutzutage gemäß Leitfaden „Schwebstoffe im Fließgewässer – Leitfaden zur Erfassung des Schwebstofftransportes“ (BMLFUW, 2008; 2017b). Zur Messung des Schwebstofftransportes wird eine Kombination aus direkten und indirekten Methoden angewandt. Um die zeitliche Variabilität des Schwebstofftransportes zu erfassen, sind optische Sonden installiert (Abbildung 10), welche die Trübung in mg/l an einer Stelle im Querprofil (Ufernähe) kontinuierlich erfassen. Die Kalibrierung der optischen Sonden erfolgt in-situ mit. Die Anzahl der Kalibrierprobenentnahmen, die in der Nähe des Sensors genommen werden, ist abhängig von der Schwebstoffkonzentration und variiert von einmal pro Woche bis zu mehrmals pro Tag bei Hochwasserereignissen.



Abbildung 10. Trübungssonde Solitax ts-line (© viadonau).

Zusätzlich wird die Verteilung der Schwebstoffkonzentration im Querprofil (räumliche Variabilität) berücksichtigt. Zur Ermittlung der mittleren Konzentration im Querprofil, wird die Vielpunktmethode teilweise kombiniert mit ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) angewendet. Bei der Vielpunktmethode werden die Schwebstoffkonzentration und die Fließgeschwindigkeit in verschiedenen Tiefen und Lotrechten im Querprofil gemessen. Diese Probenahme erfolgt bis zu 4 Mal pro Jahr mit einem Schwebstoffentnahmegesetz (Abbildung 11), das an einem Seil befestigt mittels Messeilbahn oder von der Brücke mittels einer Seilwinde (Abbildung 12) ins Wasser abgesenkt wird. Die Fließgeschwindigkeiten werden mittels ADCP, ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) oder mit einem Messflügel erfasst. An der Donau ist das ADCP-Gesetz auf einem Boot montiert und kann nur bis zum höchsten schiffbaren Wasserstand verwendet werden. Demgegenüber können das ADV und der Messflügel grundsätzlich bei allen Durchflüssen eingesetzt werden, weil diese Instrumente mittels Seilwinde abgesenkt werden.

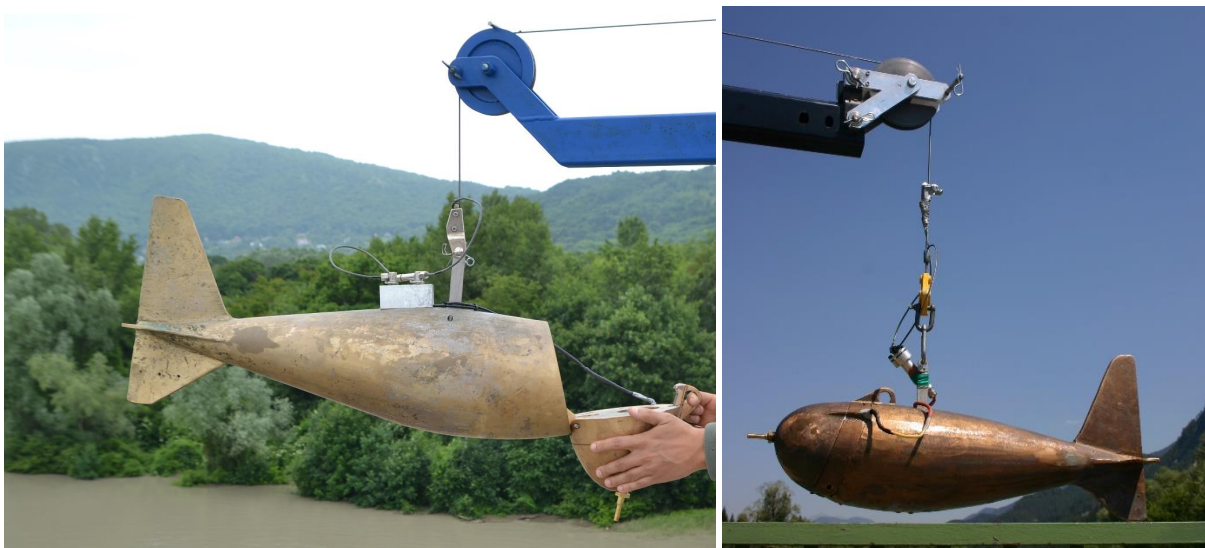


Abbildung 11. Punktintegrierendes Schwebstoffentnahmegesetz US-P63 (links) und US-P61 (rechts) (© IWA/BOKU).



Abbildung 12. Messanhänger mit Schwebstoffentnahmegesetz und ADV (links) und Schwebstoffentnahmegesetz an einer Messeilbahn (© IWA/BOKU).

#### 3.1.1.1.2 Laboranalyse

Die Laboranalyse umfasst die Bestimmung der Schwebstoffkonzentration sowie der Korngrößenverteilung. Die Schwebstoffkonzentration wird bei allen Schwebstoffmessstellen durch Vakuumfiltration (Abbildung 13) unter der Verwendung von Membranfiltern (Celluloseacetat bzw. Cellulosenitrat) mit einem Porendurchmesser von  $0,45\ \mu\text{m}$  bestimmt. Vor der Filtration wird das Probenvolumen bestimmt. Nach der Filtration wird der Membranfilter mit den abfiltrierten Stoffen mindestens 30 Minuten (je nach Material und Menge entsprechend länger) bei  $105^\circ\text{C}$  getrocknet. Danach wird das Gewicht des Filters mit den abfiltrierten Stoffen mit einer Waage (Genauigkeit von  $\pm 0,1\ \text{mg}$ ) bestimmt. Schließlich wird die Schwebstoffkonzentration ( $\text{mg/l}$ ) durch Division der Trockenmasse ( $\text{mg}$ ) durch das Volumen ( $\text{l}$ ) berechnet.



Abbildung 13. Vakuumfiltrationsanlage im Labor (© IWA/BOKU).

Die Analyse der Korngrößenverteilung wird durch eine Kombination aus Nasssiebung und Sedimentationsverfahren (Röntgendiffraktometrie oder Aräometer) oder mittels Laserbeugung bestimmt.

Je nach verwendeter Analyseverfahren werden zur Korngrößenbestimmung unterschiedliche Mengen an Trockensubstanz (von wenigen  $\text{mg}$  bis zu ca.  $30\ \text{g}$ ) benötigt. Daher ist das notwendige Probenvolumen von der während der Probenahme im Fluss vorherrschenden Schwebstoffkonzentration abhängig.

### 3.1.1.1.3 Auswertung

Im Folgenden wird die Bestimmung der Schwebstofffracht bei Messstellen, wo nur Probenentnahmen an einem Punkt im Gewässer zur Verfügung stehen, beschrieben. Obwohl eine Probe nur die Konzentration zu einem bestimmten Zeitpunkt darstellt, werden die Werte zur Darstellung der mittleren Tageskonzentration und zur Berechnung der Schwebstofffracht verwendet. An den Messstellen an der Donau wurde und wird, wenn zwei oder mehr Proben am gleichen Tag zur Verfügung stehen, der Mittelwert dieser Proben berechnet, um die mittlere Tageskonzentration zu erhalten. Für Tage, an denen keine Proben genommen wurden, wird die Konzentration durch lineare Interpolation zwischen den Konzentrationen der zeitlich nächstgelegenen Proben bestimmt, um Werte für diese Tage zu erhalten. Durch Multiplikation der mittleren täglichen Schwebstoffkonzentration mit dem Durchfluss, lässt sich der mittlere tägliche Schwebstofftransport ermitteln. Die mittlere monatliche und jährliche Schwebstoffkonzentration sowie der mittlere monatliche und jährliche Schwebstofftransport wird durch Berechnung des Mittelwerts der Tageswerte für den entsprechenden Zeitraum eruiert. An den Messstellen an den oberösterreichischen Zubringern Enns und Traun, wurden bei den historischen Auswertungen im Vergleich zur Auswertung an der Donau etwas unterschiedlich vorgegangen. Für Tage, an denen keine Proben genommen wurden, wurde die Konzentration entweder durch lineare oder wasserstandsabhängige Interpolation zwischen den Konzentrationen der zeitlich nächstgelegenen Proben bestimmt, um den Wert für diese Tage zu erhalten. Wenn zwei oder mehr Proben zur Verfügung standen wurde zuerst das Produkt aus Schwebstoffkonzentration und Durchfluss zum Entnahmezeitpunkt gebildet und anschließend der Mittelwert dieser Produkte für den jeweiligen Tag berechnet. Über die Berücksichtigung der Zeit können für die jeweiligen Zeiträume (z.B. Jahr, Monat) die Schwebstofffrachten berechnet werden.

Für die Auswertung und Berechnung des Schwebstofftransportes und der Fracht gemäß Leitfaden müssen im ersten Schritt die Trübungsdaten plausibilisiert und anschließend kalibriert werden. Zur Kalibrierung können zwei verschiedene Methoden angewendet werden, die auch miteinander kombiniert werden können. Die erste Methode berechnet einen Korrekturfaktor zwischen Trübungsdaten und Kalibrierproben für jeden Zeitpunkt, an dem Kalibrierproben entnommen wurden. Durch lineare Interpolation zwischen diesen Zeitschritten wird für jeden Trübungswert ein Korrekturfaktor (Sondenbeiwert) berechnet und somit die Ganglinie der sondennahen Schwebstoffkonzentration ermittelt. Die zweite Methode verwendet eine einfache lineare Regressionsanalyse um die Sondendaten in sondennahe Schwebstoffkonzentrationen umzurechnen und dadurch eine Ganglinie aus Schwebstoffkonzentrationen in Sondennähe zu erhalten.

Zusätzlich wird der Schwebstofftransport sowie die mittlere Schwebstoffkonzentration im Querprofil mit Hilfe der Vielpunktmethode bestimmt werden (Abbildung 14). Alternativ kann die Verteilung der Schwebstoffkonzentrationen im Querprofil aus dem ADCP-Rückstreusignal in Kombination mit örtlich zuordenbaren Wasserproben und unter Verwendung der Sonargleichung berechnet werden (Abbildung 15). Da das ADCP gleichzeitig die Fließgeschwindigkeit misst, können der Schwebstofftransport und die mittlere Schwebstoffkonzentration im Querprofil ermittelt werden.

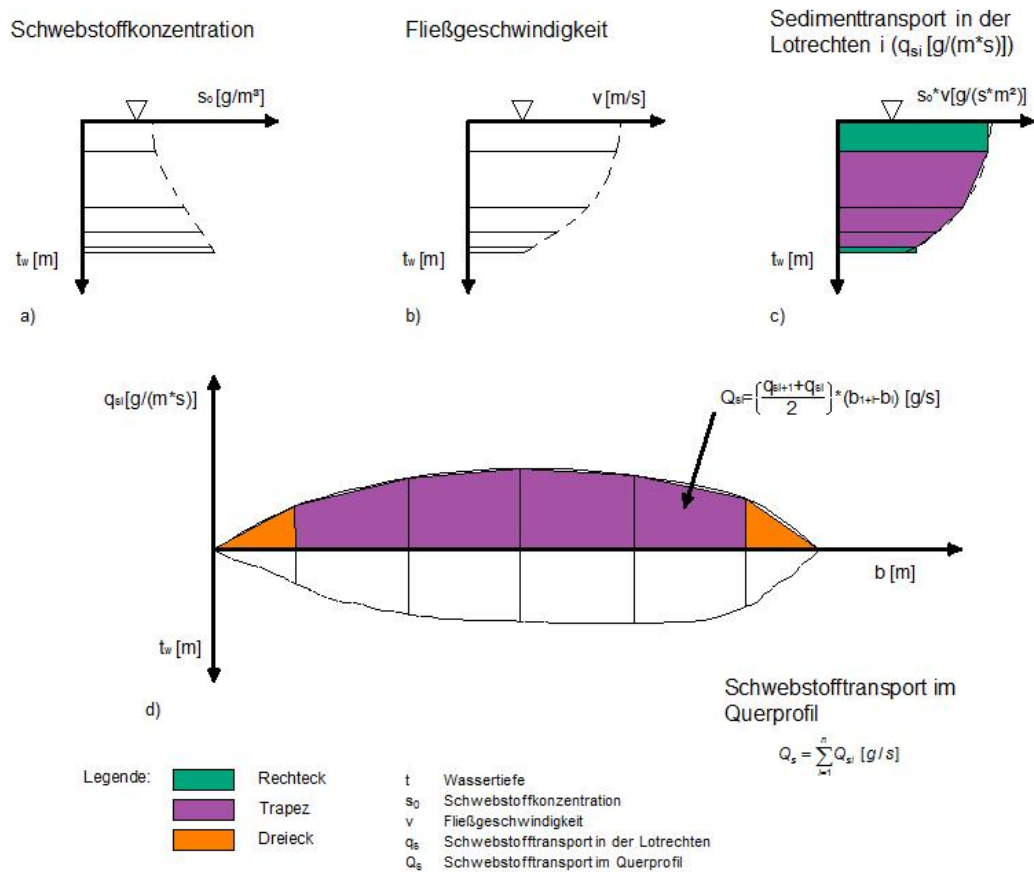


Abbildung 14. Konventionelles Auswerteverfahren für Vielpunktentnahmen (BMLFUW, 2017b; verändert nach DVWK, 1986)

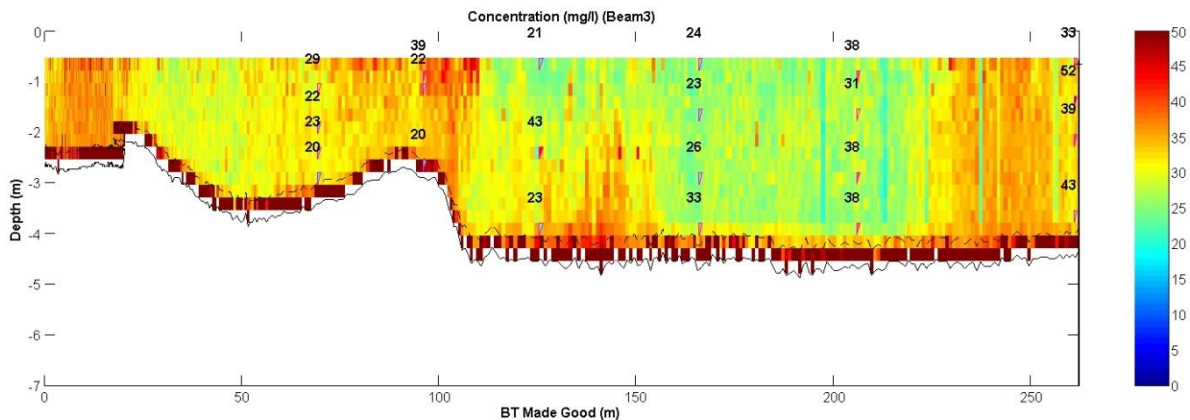


Abbildung 15. Verteilung der Schwebstoffkonzentration im Querprofil; Ergebnis einer ADCP-Messung (© IWA/BOKU).

Unter Berücksichtigung der Beziehung zwischen der Schwebstoffkonzentration in Sondennähe und der mittleren Schwebstoffkonzentration aus Vielpunkt- oder ADCP-Messungen wird eine Zeitreihe der mittleren Schwebstoffkonzentration im Querprofil erstellt. Die Multiplikation dieser Zeitreihe mit jener des Durchflusses, liefert den Schwebstofftransport. Durch anschließende Integration des Schwebstofftransports über die Zeit, können die Schwebstofffrachten bestimmt werden.

### 3.1.1.2 Geschiebemonitoring

Im Unterschied zum Schwebstoffmonitoring werden Messungen des Geschiebetransports an der österreichischen Donau nur an einer Messstelle kontinuierlich durchgeführt (Tabelle 4). In den 1930er und 1950er Jahren wurden an zwei weiteren Stellen in der freien Fließstrecke Geschiebemessungen durchgeführt. Hinzukommen noch zwei Einzelmessungen welche im Stauraum des KW Ybbs-Persenbeug durchgeführt wurden. Es handelt sich jedoch nur um einzelne Messkampagnen und kein längerfristiges Monitoring welches über mehrere Jahre durchgeführt wurde (Tabelle 4). An den Zubringern, die in Österreich in die Donau münden, werden von österreichischer Seite keine direkten Geschiebemessungen durchgeführt. Nur an der March wird vom Water Research Institute (Slowakei) bei Fluss-km 67,15 der Geschiebetransport gemessen. In der Vergangenheit fanden einzelne Messkampagnen in den Zubringern (z.B. Inn, steirische Enns) statt, welche oft in Zusammenhang mit der Errichtung von Kraftwerken standen.

Tabelle 4. Historische und aktuelle Geschiebemessstellen an der österreichischen Donau.

Messstelle	Lage (Strom-km)	Betreiber	Zeitraum
Wien	1930,80	Staatliche Versuchsanstalt für Wasserbau (Ehrenberger)	1930-1931
Bad Deutsch-Altenburg	1885,90	Bundesstrombauamt	1956-1957
Hainburg Straßenbrücke	1886,24	IWA/BOKU im Auftrag von viadonau	2006-

#### 3.1.1.2.1 Messmethodik

In den Jahren 1930 bis 1931 wurden die Geschiebemessungen von der Staatlichen Versuchsanstalt für Wasserbau (Ehrenberger, 1931 und Ehrenberger, 1942) und zwischen 1956 und 1957 vom Bundesstrombauamt (Vorgängerunternehmen von viadonau) durchgeführt. Ziel des Geschiebemonitorings war die Ermittlung der Korngrößenverteilung, des Geschiebetransports (kg/s) sowie der jährlichen Geschiebefracht (t/a). Die Messungen von Ehrenberger (1930-1931) analysierten auch die zeitliche Variation des Geschiebetransports. Für die Probenentnahme beider Kampagnen wurde der Ehrenberger-Sammler (Abbildung 16) verwendet. Der ursprüngliche Entwurf des Geschiebefängers basiert auf dem von Mühlhofer (1933) am Inn verwendeten Mühlhofer-Sammler und wurde von Ehrenberger modifiziert. Der Geschiebefänger war ein Korbsammler mit einer Größe der Einlauföffnung von 50 x 25 cm (Breite x Höhe) und einer Länge von 100 cm. Die Maschenweite des Drahtgeflechts betrug ca. 4,5 mm, wobei der Boden des Probenehmers aus Ringketten bestand, um einen flexiblen Probenehmerboden zu erhalten, der sich dem Flussbett anpassen kann. Die Messungen wurden in beiden Fällen (1930/1931 und 1956-1957) von einem Schiff aus durchgeführt, das während der Messungen mit Ankern in Position gehalten wurde.

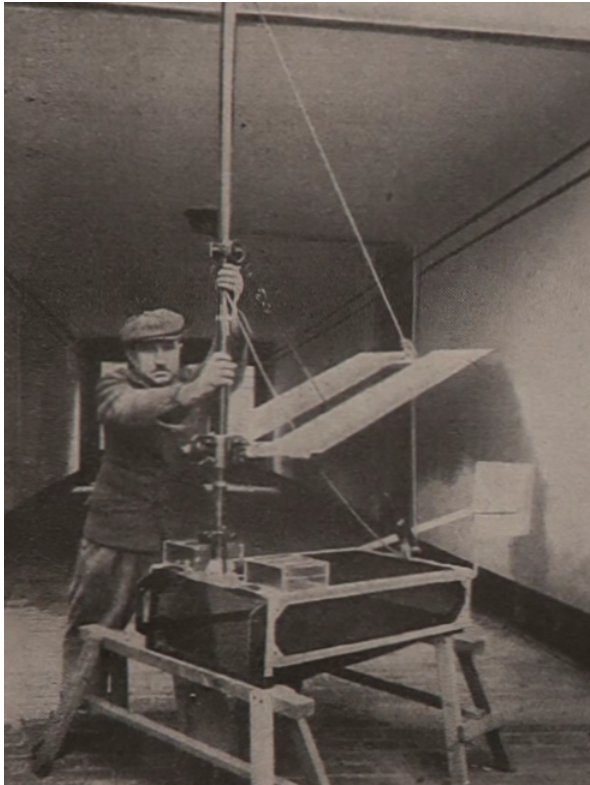


Abbildung 16. Ehrenberger-Sammler (Ehrenberger, 1942).

Seit dem Jahr 2006 wird vom Institut für Wasserbau, Hydraulik und Fließgewässerforschung (BOKU Wien) im Auftrag von viadonau das Geschiebemonitoring an der Messstelle Hainburg Straßenbrücke durchgeführt. Ziel des Monitorings ist die Ermittlung der Korngrößenverteilung, des Geschiebetransports (kg/s) und des jährlichen Geschiebefracht (t/a). Für die Geschiebemessungen wird der sogenannte BfG-Sammler eingesetzt (Abbildung 17). Das ursprüngliche Design des Probenehmers basiert auf dem Geschiebefänger „Arnheim“ (BTMA) von Delft Hydraulics (Deltares) und wurde von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) in Koblenz adaptiert. Leichte Anpassungen wurden für Messungen in der Donau durchgeführt und sollten einerseits die Konstruktion massiver machen und andererseits die Masse des Gerätes erhöhen, um dadurch eine höhere Stabilität bei der Probenahme zu erreichen. Der BfG-Sammler ist ein Druckdifferenz-Sammler mit einer Maschenweite von 1 mm, einer Öffnungsgröße von 160 x 100 mm und einem Gesamtgewicht von etwa 200 kg. Die Gesamtabmessungen des Probenehmers betragen 2,5 x 1,2 x 1,0 m (Länge x Breite x Höhe).



Abbildung 17. BfG-Sammler zur Messung des Geschiebetransports (© IWA/BOKU).

Die Messungen werden von der Hainburger Straßenbrücke oder (seltener) von einem Schiff aus durchgeführt (Abbildung 18). Wenn die Messungen von der Brücke aus durchgeführt werden, wird der Probenehmer mit einem Lastwagen, der mit einem Ladekran und einer Seilwinde ausgestattet ist, 30 m vom Brückendeck auf das Flussbett abgesenkt. Für Schiffsmessungen wird ein Bagger mit einem Stahlseil eingesetzt, wobei das Schiff zur Beibehaltung der Position während der Messung mittels Anker oder Stelzen im Strom fixiert wird.

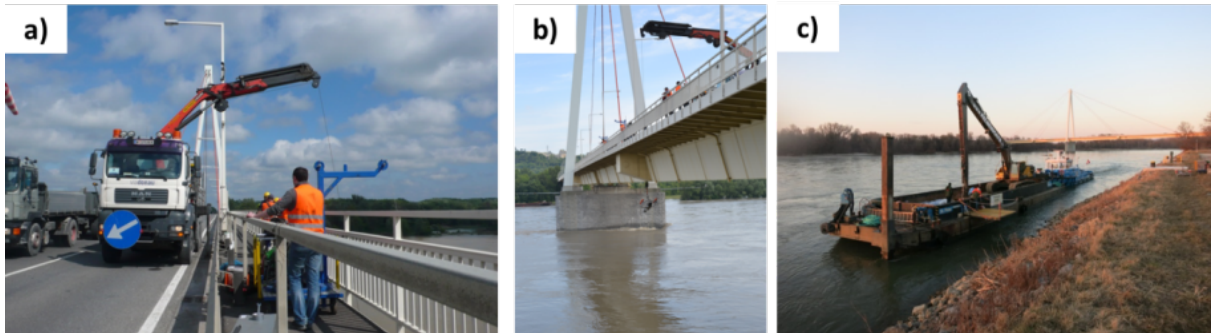


Abbildung 18. a) LKW mit Ladekran; b) Absenkung des Geschiebefängers von der Brücke; c) Schiff mit Bagger zur Durchführung von Schiffsmessungen (© IWA/BOKU).

Abhängig vom Durchfluss und ob von der Brücke oder vom Schiff aus gemessen wird, werden die Messungen in 7 - 15 Lotrechten verteilt über das Querprofil durchgeführt. In der Regel ist der Abstand zwischen den Lotrechten im Hauptstrom geringer (ca. 20 m) als im angrenzenden Bühnenfeld, wo nennenswerter Geschiebetransport nur bei höheren Durchflüssen stattfindet. In jeder Lotrechten wird der Geschiebefänger mindestens 3 Mal für 5 Minuten abgesenkt. Die Messdauer wird jedoch während Zeiten intensiven Geschiebetransports reduziert, um eine Überfüllung des Fangkorbs zu vermeiden. Eine Geschiebeprobe sollte nicht mehr als 6000 g betragen (Abbildung 19). Um die geschiebewirksame Breite zu erhalten (am relevantesten für den linken Bereich in der Nähe des Bühnenfeldes), wird die Messung solange fortgesetzt, bis mindestens bei einer Lotrechten kein Geschiebetransport gemessen wird. Die Anzahl der Geschiebemessung pro Jahr ist durchflussabhängig und beträgt derzeit durchschnittlich drei. Allerdings wurde auch schon bis zu fünfmal jährlich gemessen.

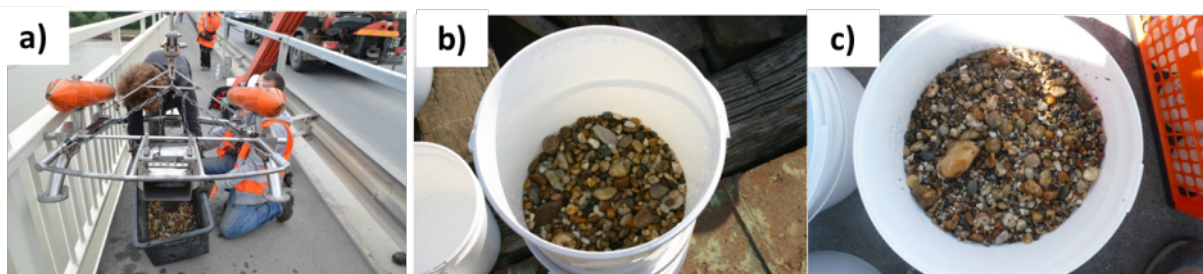


Abbildung 19. a) Entleerung einer Geschiebeprobe; b) und c) Geschiebeproben (© IWA/BOKU).

### 3.1.1.2.2 Siebanalyse

Nach der Lufttrocknung der Proben werden die trockenen Proben vor der Siebung gewogen, um das Gewicht für die Berechnung des Geschiebetransports zu erhalten. Die Trockensiebung wird mit Quadratlochsieben durchgeführt. Vor dem Sieben werden die leeren Siebe mit einer Analysewaage (Genauigkeit von  $\pm 1$  g) gewogen. Danach wird die Probe 10 Minuten lang gesiebt. Anschließend werden die einzelnen Siebe inklusive des Rückhalts gewogen. Das Gewicht jeder Fraktion wird durch



die Differenz zwischen dem zurückgehaltenen Gewicht (einschließlich des Siebgewichts) und des leeren Siebgewichts berechnet.

Die folgenden Maschenweiten (mm) kommen zum Einsatz: 125, 90, 63, 56, 31,5, 22,4, 16, 11,2, 8, 4, 2, 1, 0,5 und 0,25.

Durch die Siebanalyse erhält man schließlich folgende Ergebnisse: kumulative Korngrößenverteilung und charakteristische Korngrößen ( $D_{10}$ ,  $D_{20}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{40}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{60}$ ,  $D_{70}$ ,  $D_{80}$ ,  $D_{90}$ ,  $D_{16}$ ,  $D_{84}$ ,  $D_m$ ,  $D_{max}$  und b-Achse, die die sogenannte Zwischenachse oder Breite ist und senkrecht zur längsten Achse steht).

### 3.1.1.2.3 Auswertung

Nach Bestimmung des Trockengewichts der Proben wird der Geschiebetransport nach Dröge et al. (1992) berechnet:

1. Das Gewicht der einzelnen Proben (g) wird durch die Messdauer dividiert (s)
2. Berechnung des arithmetischen Mittels aus den berechneten Werten von Punkt 1 -> liefert den durchschnittlichen Geschiebetrieb ( $g/sb$ ), wobei b die Einlassbreite des Geschiebefängers ist
3. Umrechnung des arithmetischen Mittels aus Punkt 2 in den Geschiebetrieb pro Meter Gewässersohle ( $g/sm$ )
4. Wenn das Probengewicht 6000 g überschreitet, werden die Messdauer und das Probengewicht vor der Berechnung des Geschiebetriebs mittels eines Umrechnungsfaktors reduziert.
5. Wenn das Probengewicht 2500 g überschreitet, muss die Sammeleffizienz des BfG-Sammlers durch Multiplikation mit einem Korrekturfaktor, der von dem Gewicht der Probe abhängt, berücksichtigt werden -> Ergebnis ist der korrigierte Geschiebetrieb ( $g/ms$ ); der Korrekturfaktor basiert auf einer empirisch entwickelten Funktion, die die Sammeleffizienz auf Basis des Probengewichts berücksichtigt.
6. Grafische Darstellung der berechneten Geschiebetriebe in den einzelnen Lotrechten in Bezug auf ihre Entfernung vom Flussufer
7. Verbindung der aufgetragenen Punkte durch eine Kurve (z.B. mit spline in ACAD) und Integration über die geschiebewirksame Breite -> liefert den Geschiebetransport ( $g/s$  oder  $kg/s$ ) in Abhängigkeit des Durchflusses bzw. Wasserstands während der Probenentnahme.

Ein Beispiel für das Ergebnis einer Geschiebemessung ist in Abbildung 16 zu sehen.

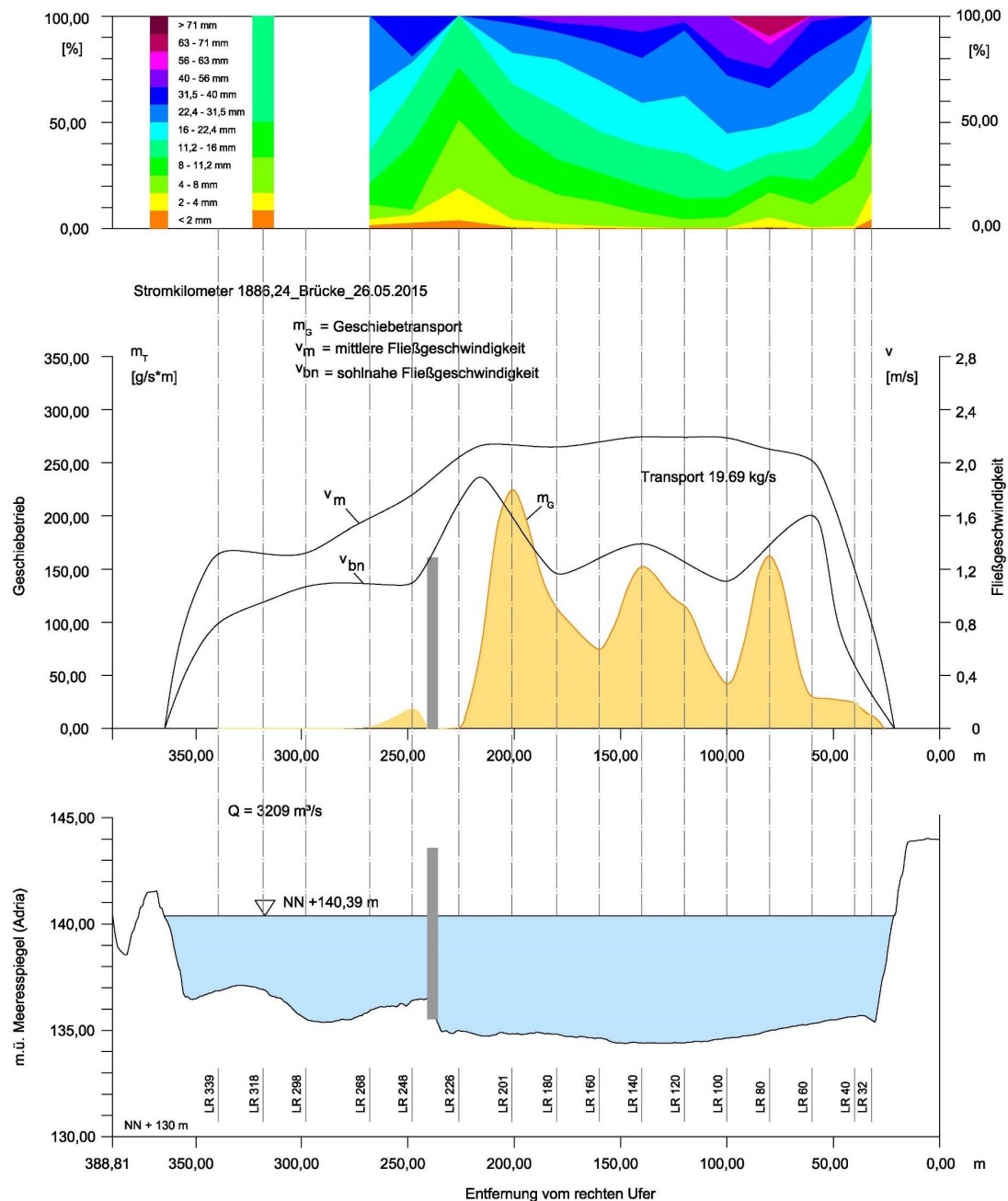


Abbildung 20. Ergebnis einer Geschiebetransportberechnung: Korngrößenverteilung, Geschiebetriebrieb in jeder Lotrechte (inkl. Geschiebetransport – gelb schattiert in der mittleren Grafik), Querprofilmessung (© IWA/BOKU).

Basierend auf den Geschiebetransportmessungen und dem zur jeweiligen Messung zugeordneten Durchfluss, wird eine Durchfluss-Geschiebefunktion (eine sogenannte „Rating Curve“) angepasst. Üblicherweise werden für die Anpassung Potenzfunktionen herangezogen. Im Fall der Donau kommt jedoch eine Sigmoid-Funktion in Kombination mit einer Linearen Funktion für sehr hohe Durchflüsse ( $> HQ_{10}$ ) zur Anwendung (Abbildung 21), um auch Durchflüsse, welche den bordvollen Abfluss überschreiten, entsprechend abzubilden. Durch Multiplikation der Durchflusszeitreihe mit der Durchfluss-Geschiebebeziehung liefert eine Zeitreihe des Geschiebetransportes im Querprofil. Durch anschließende Integration (aufsummieren) des Geschiebetransports über die Zeit, werden abschließend die Geschiebefrachten bestimmt.

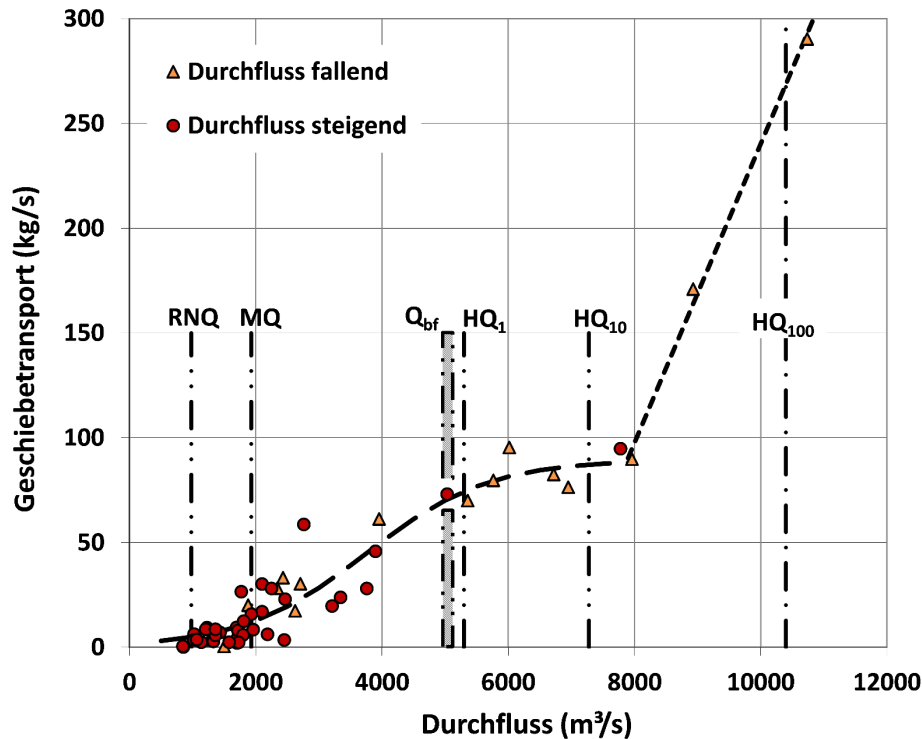


Abbildung 21. Durchfluss-Geschiebe Beziehung der Donau Östlich von Wien bei Bad Deutsch-Altenburg (modifiziert nach Liedermann, et al., 2018).

### 3.1.2 Schwebstofftransport

Die in diesem Kapitel beschriebenen Daten wurden aus unterschiedlichen Quellen zusammengetragen (HZB, 1937; Bundesministerium für Handel und Wiederaufbau, 1956; Gruber, 1969; Gruber, 1973; UNESCO, 1993; Nachtnebel et al., 2004; DanubeSediment, 2019; HD Oberösterreich; HZB; viadonau; Verbund), wobei hier häufig – v.a. bei den älteren Veröffentlichungen - die dahinterliegenden Monitoring- und Berechnungsmethoden nicht angegeben wurden. Die hierfür verwendeten Berechnungsmethoden sind unter Kapitel 3.1.1 beschrieben. Bei der Interpretation der Daten sind daher auch mögliche Änderungen beim Monitoring und der Auswertemethoden zu berücksichtigen.

Angaben oder Abschätzungen des Schwebstofftransports an der unregulierten Donau gibt es nicht. Die ersten verwertbaren Daten für Schwebstofftransportmessungen an der österreichischen Donau finden sich für die 1920er Jahre an der Messstelle Linz (HZB, 1937). Das erste Donaukraftwerk wurde in Deutschland ab 1922 errichtet und 1927 in Betrieb genommen und die ersten Kraftwerke am Inn wurden in den 1940er Jahren errichtet. Da der Inn einen bedeutend größeren Beitrag zur Schwebstofffracht liefert als die Donau in Deutschland, kann für die österreichische Donau der Zeitraum bis in die 1940er Jahre als kaum durch Kraftwerke beeinflusst betrachtet werden. Für die Donau oberhalb der Innmündung wird in diesem Zeitabschnitt eine mittlere jährliche Schwebstofffracht von 1,618 Mio. t (Vilshofen, 1930-1949, DanubeSediment, 2019) und für den Inn eine mittlere jährliche Schwebstofffracht von 4,781 Mio. t (Braunau, 1934-1937; HZB 1937) angegeben. Für die Messstelle Linz ergibt sich für den Zeitraum von 1928 bis 1937 eine mittlere jährliche Schwebstofffracht von 6,7 Mio. t (Abbildung 22).

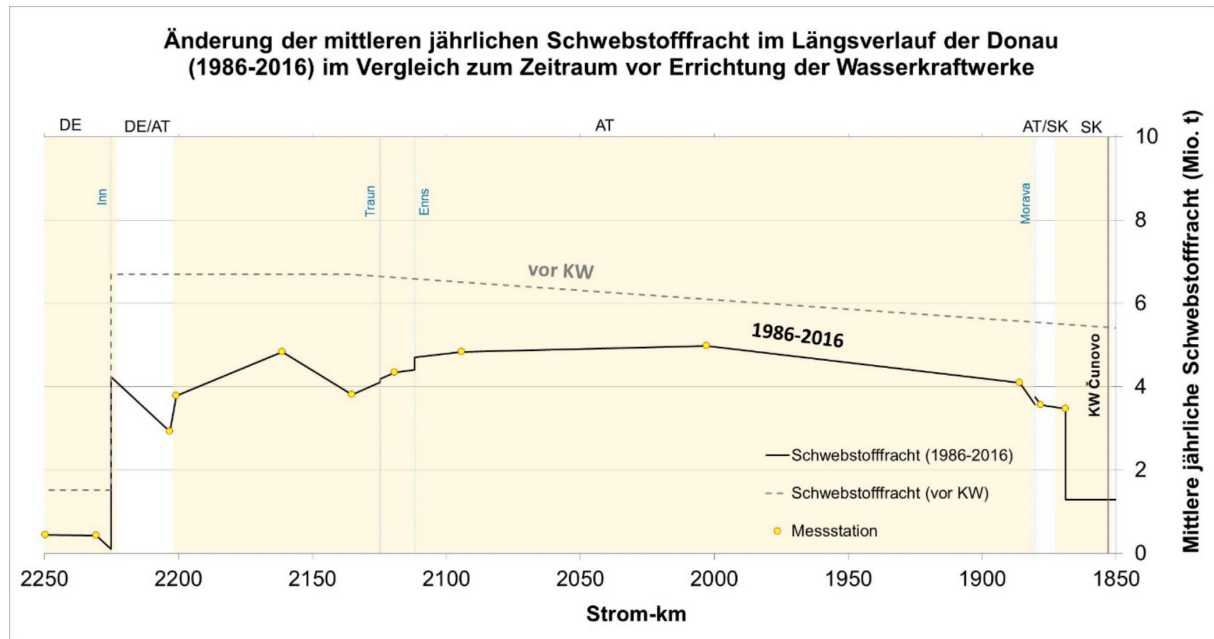


Abbildung 22. Mittlere jährliche Schwebstofffracht im Längsverlauf der Österreichischen Donau. Vergleich vor Errichtung der Kraftwerke mit dem Zeitraum 1986 bis 2016 (verändert nach DanubeSediment, 2019).

Ab den 1950er Jahren wurden auch die ersten Kraftwerke an der österreichischen Donau errichtet und erst mit der Inbetriebnahme des Kraftwerks Freudenau im Jahr 1998 war der Kraftwerksausbau abgeschlossen. Mit dem Bau der Kraftwerke nahmen auch die Schwebstoffmessstellen an der Donau zu (Tabelle 1). Für diesen Zeitraum (Messbeginn bzw. 1954-1998) wurden an den Messstellen mittlere jährliche Schwebstofffrachten  $3,0 \pm 0,4$  Mio. t errechnet.

In Abbildung 23 bis Abbildung 29 sind die Zeitreihe der jährlichen Schwebstofffrachten und die mittleren jährlichen Durchflüsse von Beginn der Daten bis zum Jahr 2016 sowie die Doppelsummenkurven aus der spezifischen Schwebstofffracht und der Abflusspende für die Stationen dargestellt, bei denen die Daten in längeren durchgehenden Reihen vorliegen. Bei der Schwebstoffmessstation Linz ist nur die Schwebstofffracht für das Jahr 1945 nicht vorhanden. An der Messstation Linz ist eine Abnahme der jährlichen Schwebstofffracht ab den späten 1930ern erkennbar, die auf die Errichtung der Kraftwerke am Inn zurückzuführen sein dürfte. Die meisten anderen Messstellen wurden erst im Zuge des Kraftwerksbaus errichtet, weshalb der unbeeinflusste Zustand nicht dargestellt und diese Abnahme der Schwebstofffrachten an diesen Messstellen nicht ersichtlich ist. Für die meisten Messstellen, außer an der Messstation Engelhartzell am oberen Ende der Staukette, ist jedoch eine Zunahme in den mittleren jährlichen Schwebstofffrachten und ein einhergehender Knick in der Doppelsummenkurve ab Mitte der 1980er bis Anfang der 1990er Jahre zu erkennen. Dies könnte auf ein Erreichen eines stabilen Verhandlungsniveaus in den Stauräumen zurückzuführen sein. Die Darstellung in Abbildung 25 zeigt jedoch, dass die Schwebstofffrachten an der Messstation Linz nicht an das Niveau aus den 1920er und 1930er Jahre herankommen. Die Hochwasserereignisse in den Jahren 2002 und 2013 sind in diesem Zusammenhang ebenfalls von Bedeutung und auch Landnutzungsänderungen können eine Rolle spielen. Mögliche Änderungen beim Monitoring und der Auswertemethoden sind jedoch bei der Interpretation der Daten ebenfalls zu berücksichtigen.

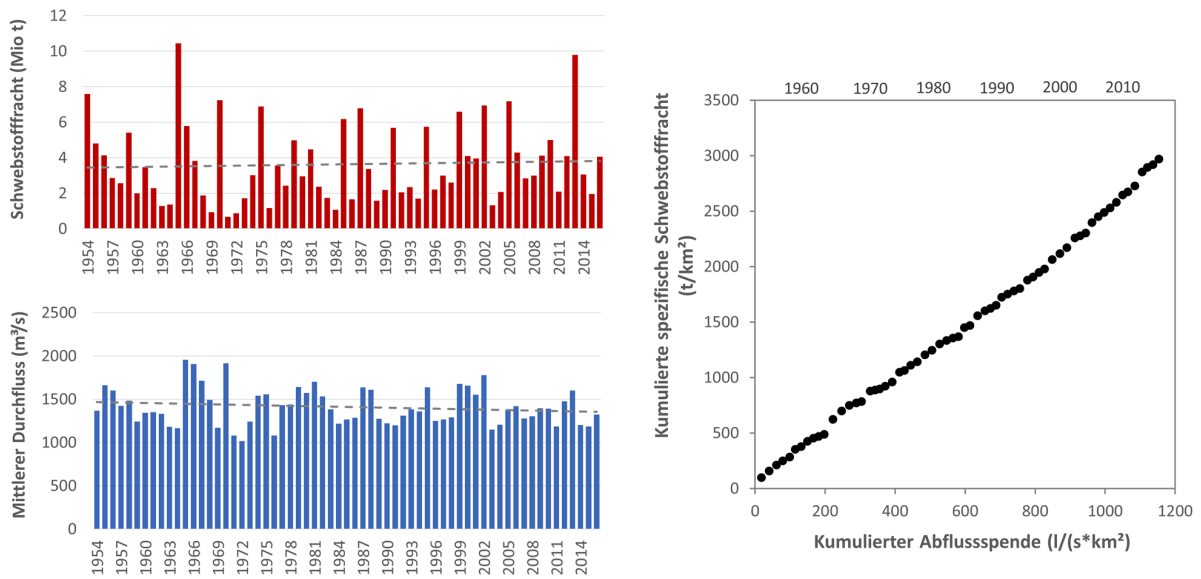


Abbildung 23. Schwebstoffjahresfrachten (links oben), mittlere Jahresdurchflüsse (links unten) und Doppelsummenkurve der spezifischen Schwebstofffracht und der Abflusspende (rechts) an der Messstelle Engelhartzell (Datengrundlage: HZB, viadonau und Verbund).

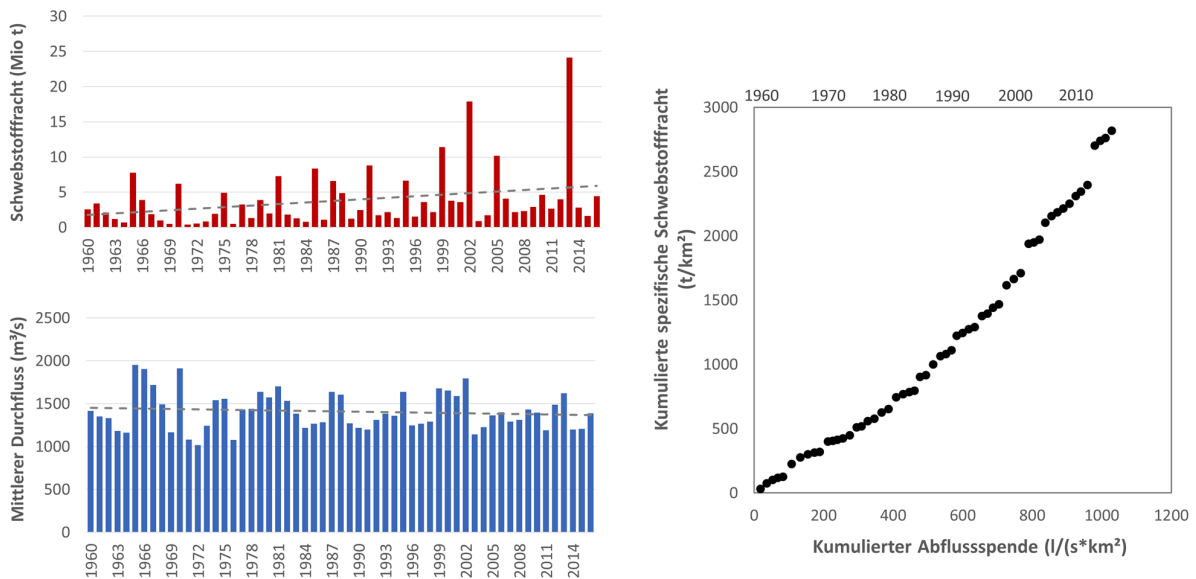


Abbildung 24. Schwebstoffjahresfrachten (links oben), mittlere Jahresdurchflüsse (links unten) und Doppelsummenkurve der spezifischen Schwebstofffracht und der Abflusspende (rechts) an der Messstelle Strombauleitung Aschach (Datengrundlage: viadonau und Verbund).

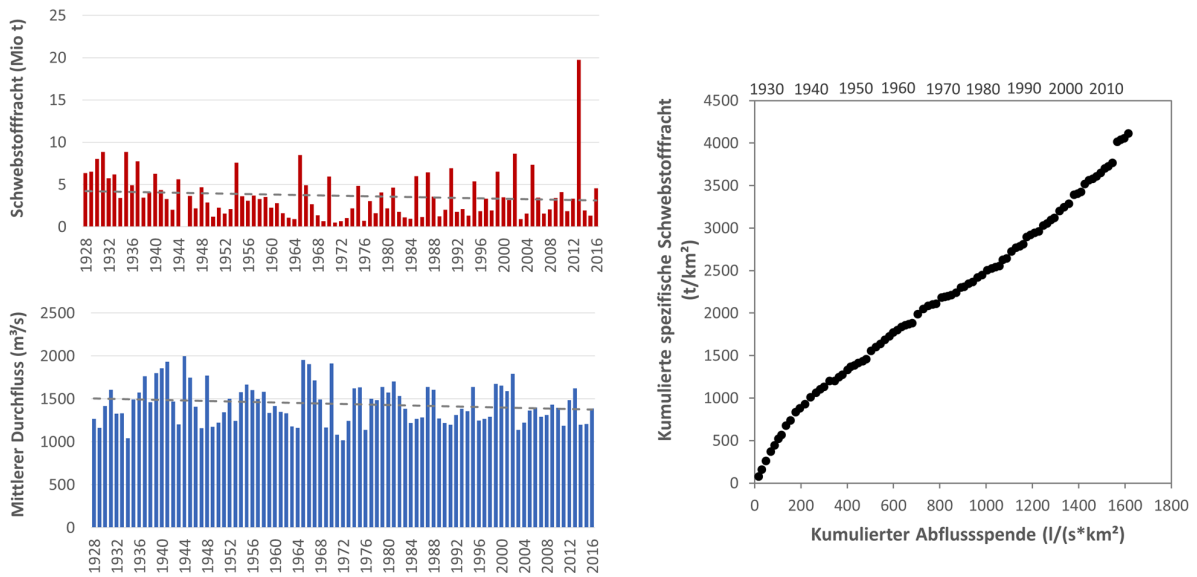


Abbildung 25. Schwebstoffjahresfrachten (links oben), mittlere Jahresdurchflüsse (links unten) und Doppelsummenkurve der spezifischen Schwebstofffracht und der Abflusspende (rechts) an der Messstelle Linz (Datengrundlage: HZB, HZB, 1937; Bundesministerium für Handel und Wiederaufbau, 1956; Gruber, 1969; UNESCO, 1993; viadonau und Verbund).

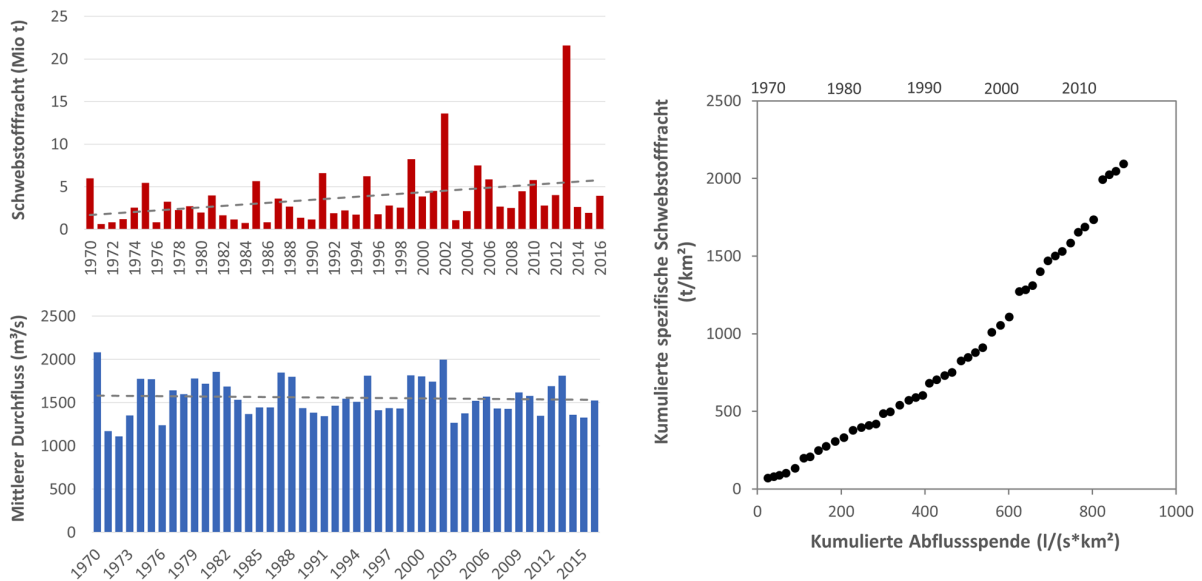


Abbildung 26. Schwebstoffjahresfrachten (links oben), mittlere Jahresdurchflüsse (links unten) und Doppelsummenkurve der spezifischen Schwebstofffracht und der Abflusspende (rechts) an der Messstelle Abwinden-Asten (Datengrundlage: Nachtnebel et al., 2004; HZB; viadonau; Verbund).

Kapitel 3 - Ergebnisse

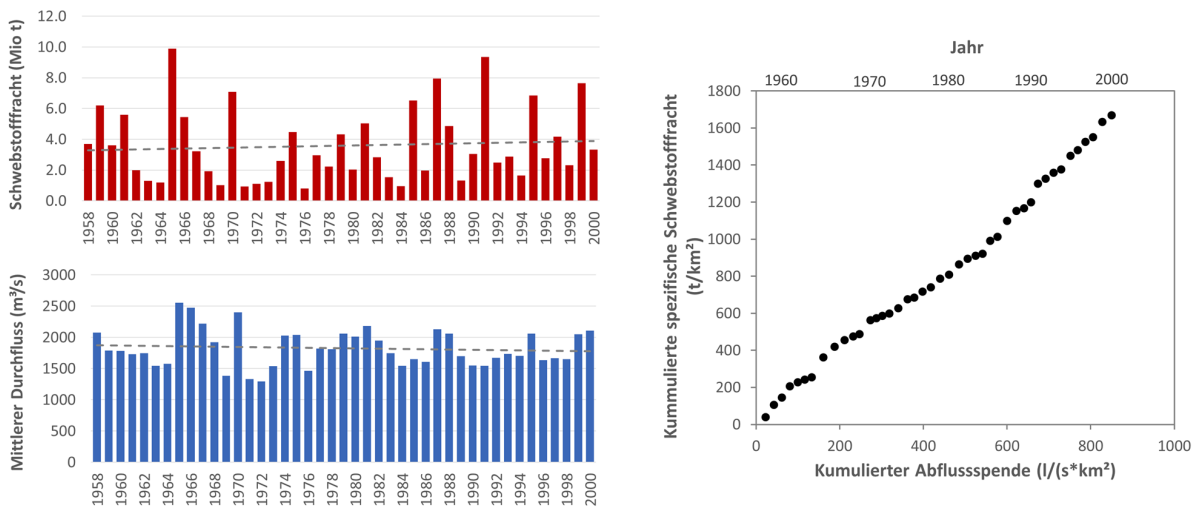


Abbildung 27. Schwebstoffjahresfrachten (links oben), mittlere Jahresdurchflüsse (links unten) und Doppelsummenkurve der spezifischen Schwebstofffracht und der Abflussspende (rechts) an der Messstelle Ybbs-Persenbeug (Datengrundlage: Bundesministerium für Handel und Wiederaufbau, 1956; Gruber, 1969; 1973; Nachtnebel et al., 2004; HZB; viadonau; Verbund).

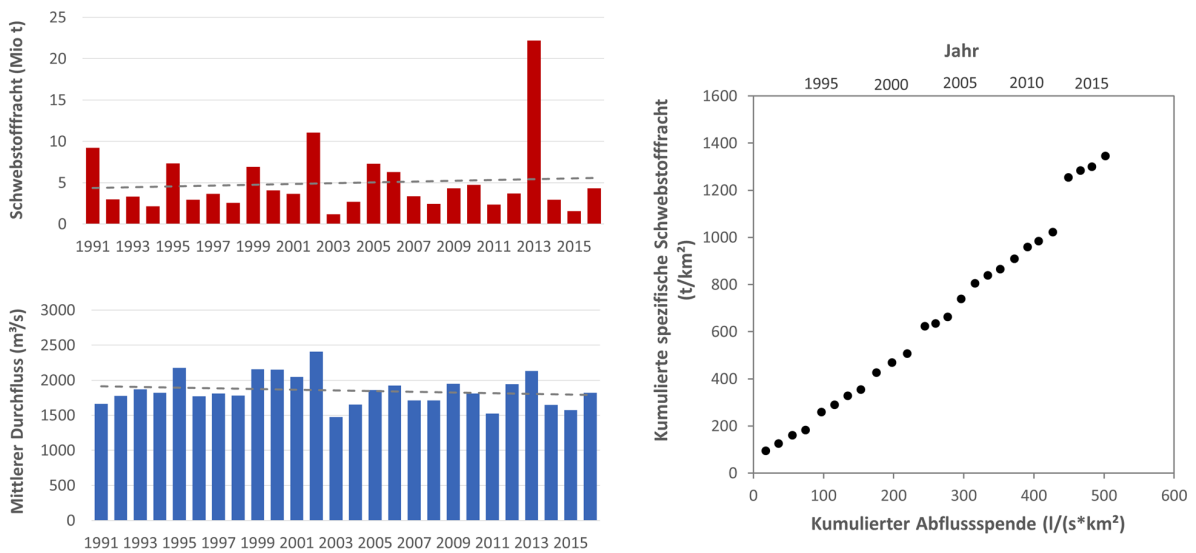
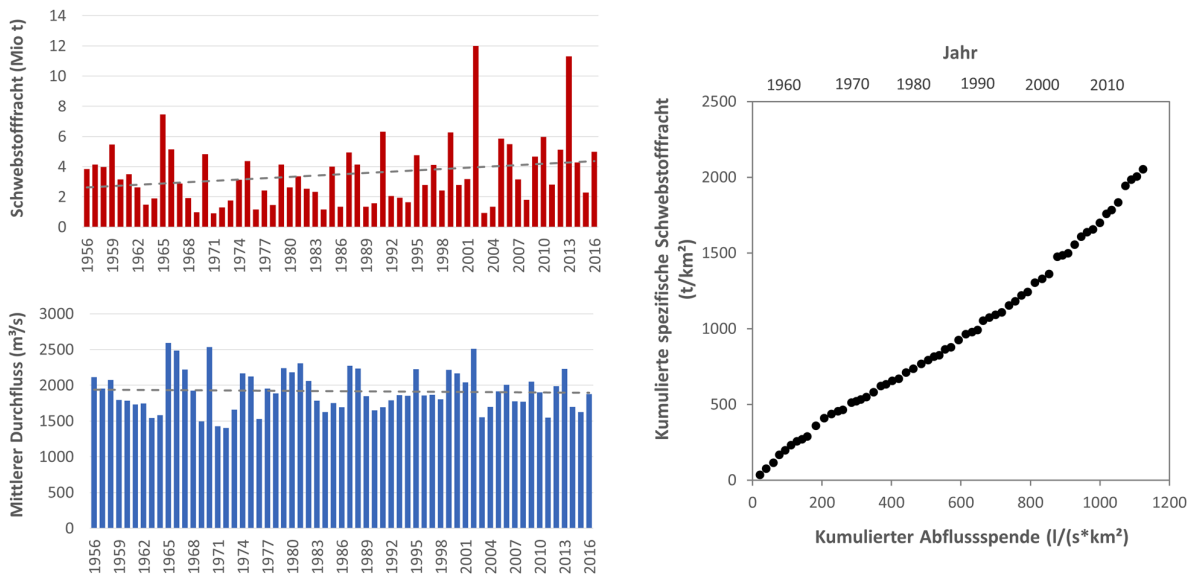


Abbildung 28. Schwebstoffjahresfrachten (links oben), mittlere Jahresdurchflüsse (links unten) und Doppelsummenkurve der spezifischen Schwebstofffracht und der Abflussspende (rechts) an der Messstelle Stein-Krems (Datengrundlage: viadonau).



**Abbildung 29. Schwebstoffjahresfrachten (links oben), mittlere Jahresdurchflüsse (links unten) und Doppelsummenkurve der spezifischen Schwebstofffracht und der Abflussspende (rechts) an den Messstellen Bad Deutsch-Altenburg (bis 2007) und Hainburg Straßenbrücke (ab 2008) (Datengrundlage: UNESCO, 1993; HZB, viadonau).**

Die Schwebstoffbilanz an der Donau und den Zubringern Inn, Traun, Enns und March ist für den Zeitraum 2008-2016 in Abbildung 30 veranschaulicht. Die mittlere jährliche Schwebstofffracht der deutschen Donau ist vor allem auch durch die großen Speicher an den Zubringern Lech und Isar geringer als die historische Fracht (1.515 Mio. t Vilshofen 1931-1955) und liegt heute bei 0,235 Mio. t (Kachlet: 2008-2015) (DanubeSediment, 2019). Der Inn als bedeutendster Zubringer der Oberen Donau trägt 4,968 Mio. t (Schärding: 2008-2016) zur mittleren jährlichen Schwebstofffracht der Donau bei. Entlang der österreichischen Donau schwankt die mittlere jährliche Schwebstofffracht der einzelnen Messstellen zwischen 4,125 und 5,528 Mio. t und wird dabei von Kraftwerken (Ablagerung und Remobilisierung) und den Zubringern z. B. Traun (0,108 Mio. t bei Wels-Lichtenegg: 2008-2016) und Enns (0,487 Mio. t bei Steyr-Ortskai: 2008-2016) beeinflusst. An der Messstelle Hainburg Straßenbrücke wird eine mittlere jährliche Schwebstofffracht von 5,080 Mio. t (2008-2016) erfasst. Die March trägt noch 0,150 Mio. t (Angern: 2008-2016) bei, bevor die Donau Österreich verlässt.



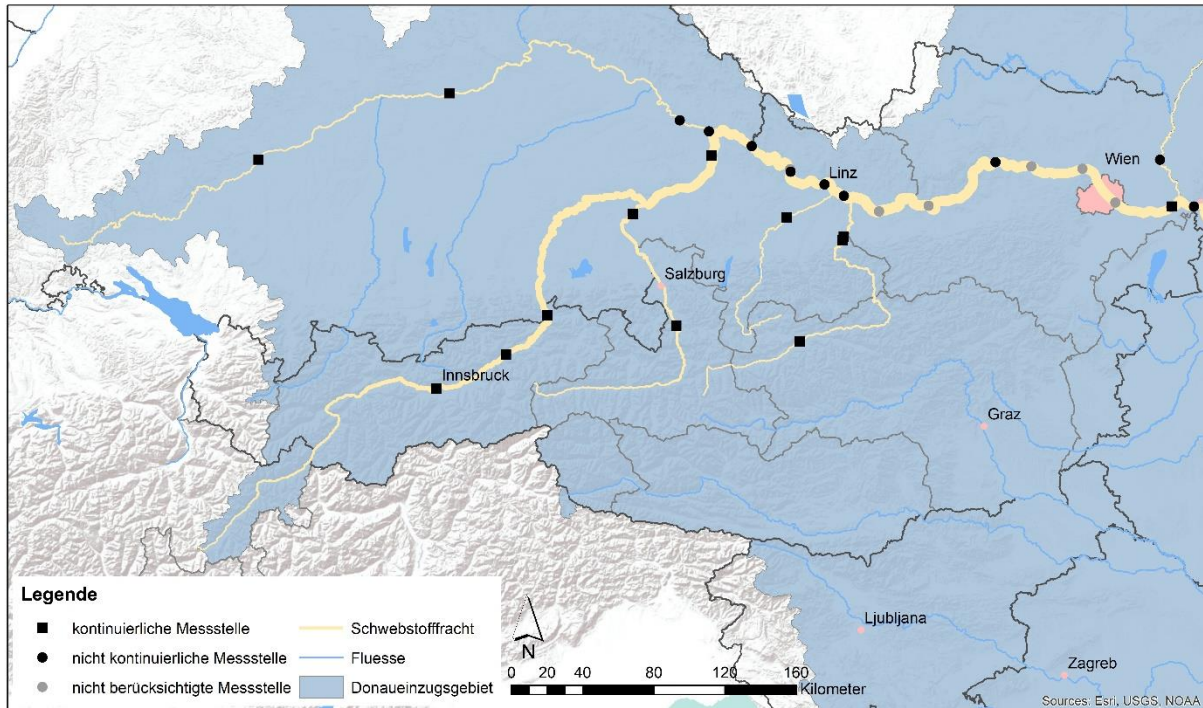


Abbildung 30. Schwebstoffbilanz an der Donau und wichtigen österreichischen Zubringern (Datengrundlage: ehyd, viadonau, Verbund, DanubeSediment).

### 3.1.3 Geschiebetransport

Die Angaben zum Geschiebetransport für die unregulierte Donau in Österreich basieren hauptsächlich auf Annahmen, da es keine (bekannten) direkten Messungen des Geschiebetransports gibt. Es können daher nur grobe Schätzungen vorgenommen werden. Rosenauer (1947) schätzt den jährlichen Geschiebetransport auf der österreichischen Donau bei Linz (Strom-km 2135) auf ca. 300.000 m<sup>3</sup>/a und flussabwärts von Mauthausen (bei Strom-km 2111; nach dem Zufluss von Traun und Enns) auf ca. 430.000 m<sup>3</sup>/a. Für die Enns gibt er ebenfalls eine Schätzung von ca. 100.000 m<sup>3</sup>/a und für die regulierte Traun von 38.000 m<sup>3</sup>/a an. Schmautz et al. (2000) von einem Geschiebeeintrag von ca. 500.000 m<sup>3</sup>/a in die österreichische Donau vor der Regulierung und dem Bau von Wasserkraftwerken in den großen Zuflüssen aus. Auf Basis verschiedener Quellen und eigener Berechnungen weisen sie eine jährliche Geschiebezufuhr aus dem Inn von 330.000 m<sup>3</sup>/a, der Enns von 150.000 m<sup>3</sup>/a, der Traun von 10.000-15.000 m<sup>3</sup>/a und der Ybbs von 5.000-15.000 m<sup>3</sup>/a aus. Der Geschiebeeintrag aus der deutschen Donau ist für den Zeitraum zwischen 1880 und 1924 bereits nahe Null (rund 10.000 m<sup>3</sup>/a) und wurde schließlich durch die Inbetriebnahme des Kraftwerks Kachlet (Strom-km 2230,8) unterbrochen (Bauer, 1965).

Mit den Schätzungen von Rosenauer (1947) und Schmautz et al. (2000) ist das Geschiebe vor den großen Regulierungen in Abbildung 31 zusammengefasst.

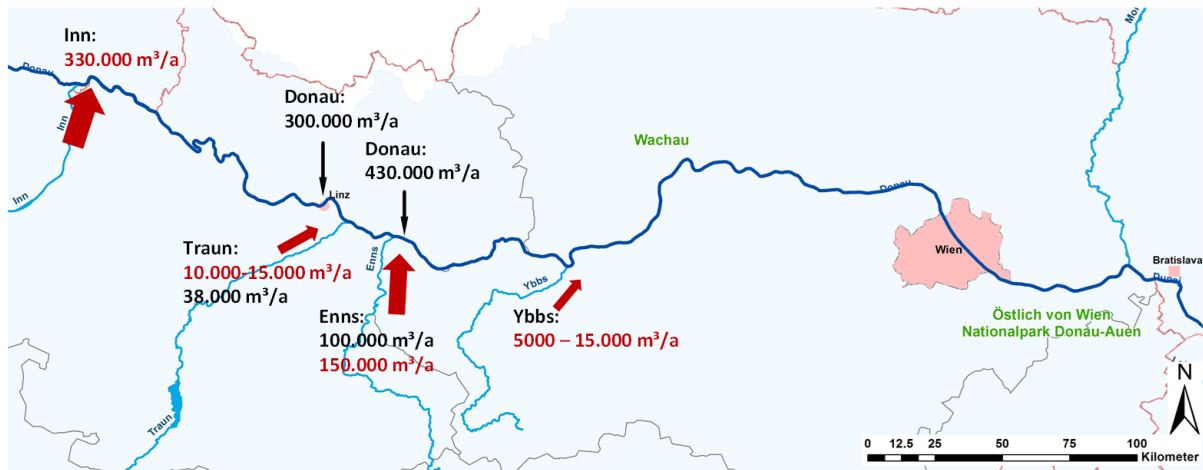


Abbildung 31. Abschätzung des Geschiebeeintrags aus den Nebenflüssen in die Donau vor größeren Regulierungen und Wasserkraftwerksbauten. Rote Zahlen aus Schmutz et al. (2000) und schwarze Zahlen aus Rosenauer (1947).

Ehrenberger (1931) hat den Geschiebetransport direkt gemessen und gibt in Ehrenberger (1942) für Wien bei Strom-km 1930,8 für das Jahr 1930/31 (Juli bis Dezember 1930 und Jänner bis Juni 1931) einen Transport von rund 656.000 m<sup>3</sup>/a an. Zusätzlich berechnet er ausgehend von der hydrologischen Charakteristik („sehr nass“, „ziemlich trocken“ und „mäßig trocken“) die Jahresfrachten für die Jahre 1910, 1921 und 1925 zu 944.000, 343.000 und 481.000 m<sup>3</sup>/a. Im Mittel über die vier Jahre ergibt sich so eine Geschiebefracht von 606.000 m<sup>3</sup>/a (das entspricht rund 1.060.000 t/a bei einer Lagerungsdichte von 1.75 t/m<sup>3</sup>). 1956/1957 in Bad Deutsch-Altenburg kommt das Bundesstrombauamt bei direkten Messungen mit rund 600.000 m<sup>3</sup>/a (Schmutterer, 1961) auf einen vergleichbaren Wert. Beide Werte sind für die Donau in einem regulierten Zustand. Das Kraftwerk Jochenstein war zur Zeit der Kampagne 1956/1957 bereits in Betrieb, aber es ist davon auszugehen, dass sich der Einfluss noch nicht so weit nach stromab ausgebreitet hat. Zu beachten ist, dass die ersten Kraftwerke im Unterinntal bereits 14 bis 15 Jahre früher in Betrieb genommen wurden. Gruber (1973) schätzt den Geschiebetransport in Linz für den Zeitraum 1950-1957 auf 300.000 t/a (das entspricht rund 170.000 m<sup>3</sup>/a), gibt aber nicht an, wie die Werte ermittelt wurden. Zusätzliche Geschiebefrachten für die regulierte Donau basierend auf Einträge in Stauräume und Bilanzierungen finden sich in verschiedensten Quellen. So gibt Schmutterer (1961) 300.000 m<sup>3</sup>/a (basierend auf einem mehrjährigen Mittel) für Jochenstein an. Laut Gruber (1969) beträgt die Fracht bei Wallsee rund 369.000 m<sup>3</sup>/a im Zeitraum 1957 bis 1961. Dies deckt sich auch mit den Beobachtungen von Kobilka und Hauck (1982), welche in zwei Jahren mit größeren Hochwässern Geschiebeeinträge von 300.000 m<sup>3</sup> (1970) und 400.000 m<sup>3</sup> (1975) in den Stauraum Wallsee-Mitterkirchen feststellen. Schmutterer (1961) gibt eine Geschiebefracht von 457.000 m<sup>3</sup> im Jahr 1959 (erstes Jahr nach Inbetriebnahme) für Ybbs-Persenbeug an und für die Jahre 1958 bis 1962 errechnen sich aus den Werten in Kobilka und Hauck (1982) rund 320.000 m<sup>3</sup>/a als Eintrag in den Stauraum Ybbs-Persenbeug. Für das Tullner-Feld gibt Gruber (1969) einen Wert von 570.000 m<sup>3</sup>/a an und für Bad Deutsch-Altenburg 497.000 m<sup>3</sup>/a. In Summe bewegen sich die Geschiebefrachten zwischen 300.000 und 600.000 m<sup>3</sup>/a, wobei die kleineren Frachten (300.000 bis 457.000 m<sup>3</sup>/a) auf den Donauabschnitt stromauf von Ybbs-Persenbeug entfallen.

Der Geschiebeeintrag in die österreichische Donau ist heute nahe Null. Der Eintrag aus dem Inn im Jahr 1965 war bereits kleiner als 10.000 m<sup>3</sup>/a (Bauer, 1965). Die Traunmündung wird durch den Rückstau des Kraftwerks Abwinden-Asten beeinflusst und das Restgeschiebe wird in einem

Geschiebefang aufgefangen. Gleiches gilt für die Enns, die durch den Rückstau des Kraftwerks Wallsee-Mitterkirchen beeinflusst wird und in der der Ennschafan als Sedimentfalle fungiert.

Aktuell werden an der Donau Geschiebemessungen nur an der Projektmessstelle Hainburg Straßenbrücke (Strom-km 1886,24) von IWA/BOKU im Auftrag von viadonau durchgeführt. Die Jahresgeschiebefracht der Donau östlich von Wien für den Zeitraum von 2009 – 2018 liegt im Mittel bei 380.000 t/a. Im Donauabschnitt östlich von Wien stammt das Geschiebe aus der erodierenden Sohle und der Kieszugabe durch den Verbund unterhalb des Kraftwerks Freudenau. Hinzukommen die Geschiebeumlagerungen der viadonau im Zuge von Erhaltungs-baggerungen für die Binnenschifffahrt, welche seit 2009 zu Berg stattfinden und seit 2015 mit Verfuhrweiten von über 10 km (Simoner, 2018). Vergleicht man die heutige Geschiebefracht in der freien Fließstrecke östlich von Wien (Strom-km 1886,24) mit den bisherigen Messungen von 1956/1957 in Bad Deutsch-Altenburg (Strom-km 1885,90), so hat der jährliche Geschiebetransport um über 50% abgenommen. Wie bereits erwähnt, stellen die Messungen von 1956/1957 die Donau in einem regulierten Zustand dar, aber noch vor dem Bau der Kraftwerkskette. Auch die Korngrößen des transportierten Geschiebes haben im Vergleich zu den früheren Messungen zugenommen. So lag der  $D_m$  (arithmetisches Mittel nach Meyer-Peter und Müller) bei den Messungen von Ehrenberger (1931) 1930/31 bei rund 13 mm, 1956/57 in Bad Deutsch-Altenburg bei 13 mm (Schmutterer, 1961) und 1962-1965 in Bad Deutsch-Altenburg bei 26 mm (Gruber, 1969). Diese Vergrößerung des Geschiebes zwischen 1956/57 und 1962-1965 schrieb Gruber (1969) dem Bau des KW Ybbs-Persenbeug (Vollstau 1958) zu, welches das feinere und mehr dem Abrieb unterworfenen Geschiebe aus dem Raum Oberösterreich zurückhält. Heute liegt der  $D_m$  für die Messungen bei Bad Deutsch-Altenburg (Hainburg Straßenbrücke Strom-km 1886,24) bei rund 22 mm.

### 3.1.4 Einfluss von Hochwasserereignissen

Auf Schwebstoffe entfällt ein wesentlich größerer Masseanteil des Feststofftransportes im Vergleich zum Geschiebe. In der Literatur wird hierfür häufig ein Geschiebeanteil von 10 bis 20% an der gesamten Sedimentfracht genannt (z.B. Turowski et al. 2010). An der Messstelle Hainburg Straßenbrücke, der einzigen Messstelle an der Donau an der sowohl der Geschiebe- als auch der Schwebstofftransport erfasst wird, erreichte der Anteil des Geschiebetransports im Zeitraum 2008-2016 in Jahren, in denen Durchflüsse bis maximal einem einjährigen Hochwasser auftraten, ebenfalls in etwa einen Wert von rund 10% des gesamten Feststofftransportes. In Jahren, in denen auch größere Hochwasserereignisse auftraten, lag der Anteil niedriger und im Jahr 2013 (HQ<sub>200</sub>) bei nur 5%.

Über einen längeren Zeitraum betrachtet liegt der effektive Durchfluss, bei dem der Großteil des Geschiebes transportiert wird, an der Donau etwa bei Mittelwasser (Gmeiner et al. 2016). Jedoch können, vor allem beim Schwebstofftransport, einzelne Hochwasserereignisse einen bedeutenden Anteil zur Jahresfracht beitragen (BMLFUW, 2008; 2017b, Haimann et al., 2018). Abbildung 32 zeigt einen Vergleich der Anteile der Tages-, Ereignis- und Monatsfrachten an der Jahresfracht bezogen auf das größte Durchflussereignis des Jahres. Die Grafik erlaubt dadurch einen Vergleich der relativen Verteilungen von Durchfluss, Schwebstoff- und Geschiebetransport der Donau an der Messstelle Hainburg Straßenbrücke. Der Anteil der 5-tägigen Ereignisfracht an der Donau betrug beim Schwebstoff bis zu 40% der Jahresfracht (Hochwasser Juni 2013) und blieb nur in den Jahren 2008, 2012 und 2014, in denen keine bedeutenden Hochwasserereignisse (max. HQ<sub>1</sub>) auftraten, unter

10 %. Beim Geschiebe trug nur die Ereignisfracht (5 Tage) im Jahr 2013 mit 15% wesentlich zur Jahresfracht bei.

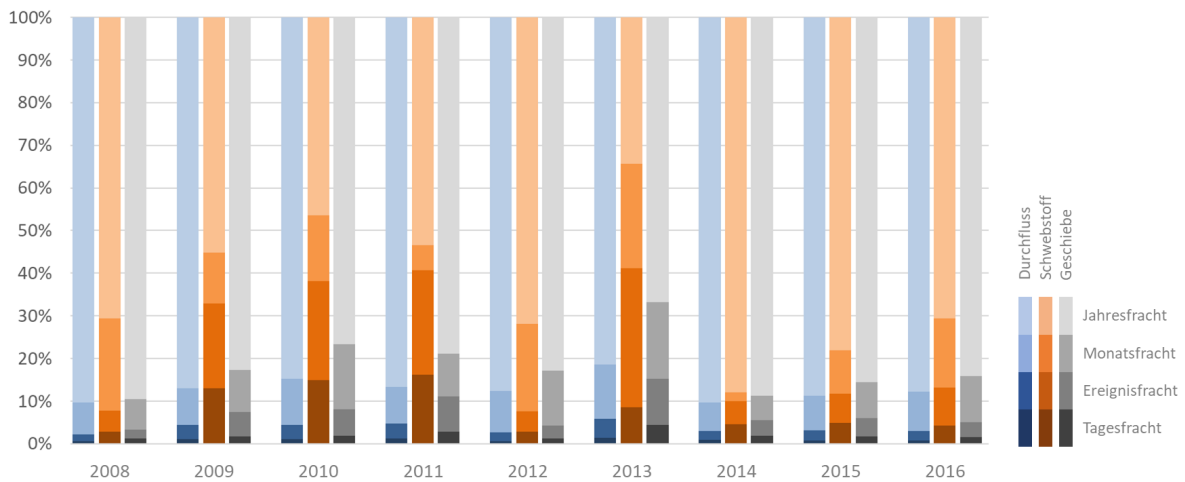


Abbildung 32. Anteil der Tages-, Ereignis (5 Tage) - und Monatsfrachten an der Gesamtjahresfracht von Durchfluss (blau), Schwebstoff (orange) und Geschiebe (grau) an den Messstellen Hainburg Straßenbrücke / Donau (Datengrundlage: Durchfluss und Schwebstoff: ehyd) (modifiziert nach Haimann et al., 2018).

Während eines Hochwasserereignisses müssen die Durchflussspitze und das Maximum im Sedimenttransportes zeitlich nicht gleichzeitig auftreten, sondern können mehrere Stunden bis zu Tagen auseinander liegen. In der Literatur (z. B. Asselman 1999; Lenzi und Marchi 2000) findet man Untersuchungen über Sedimenttransport während Hochwasserereignissen, die über diese Hystereseeffekte berichten. Eine positive Hysterese oder eine Hysterese im Uhrzeigersinn, bei der die Sedimentspitze vor der Durchflussspitze auftritt, weist auf eine Sedimentverarmung im Gerinnesystem oder den erhöhten Anteil des Basisabflusses während des abnehmenden Ast der Hochwasserwelle hin. Eine negative Hysterese, bei der der Durchfluss vor dem Sediment das Maximum erreicht, tritt in der Regel seltener auf und liegt meist dann vor, wenn die Sedimentquelle in größerer Entfernung vom Fluss liegt oder wenn Talhänge die wichtigsten Sedimentquellen bilden (Asselman, 1999). Auch an den österreichischen Geschiebe- und Schwebstoffmessstellen wurden diese Hystereseeffekte bereits mehrfach beobachtet. Besonders deutlich war dieser jedoch während des Hochwasserereignisses im Juni 2013 an der Donau festzustellen. Die Gegenüberstellung des Durchflusses und der mittleren Schwebstoffganglinie dieses Ereignisses bei der Hainburger Straßenbrücke zeigt (Abbildung 33), dass die Schwebstoffspitze rund zwei Tage vor der eigentlichen Durchflussspitze auftrat (Haimann et al., 2018).

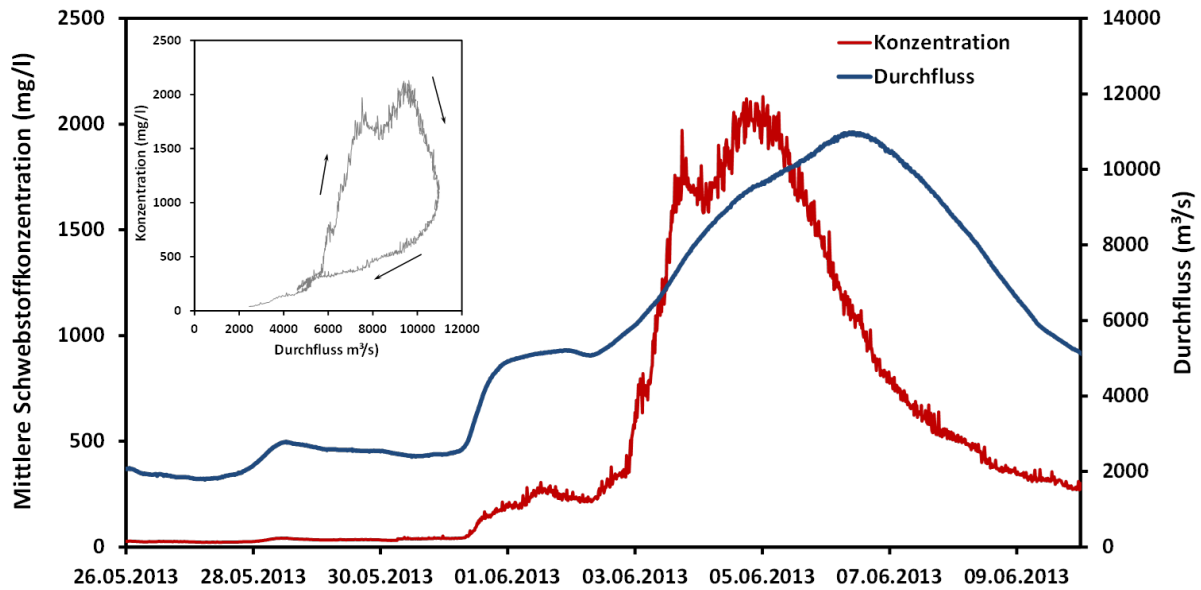


Abbildung 33. Ganglinie der mittleren Schwebstoffkonzentration (rot) und des Durchflusses (blau) während des HW-Ereignisses im Juni 2013 an der Messstelle Hainburg Straßenbrücke an der Donau. Insert: Hystereseeffekt während des HW 2013 (Gmeiner et al. 2016; Datengrundlage: viadonau).

Durch die Errichtung der Kraftwerke an der Donau hat sich der Anteil der Schwebstoffe, die während Hochwasserereignissen transportiert werden, an der Jahresfracht noch verstärkt (Nachtnebel et al. 2004). Sedimente, die sich bei niedrigeren Durchflüssen durch die geringeren Fließbedingungen in den Stauräumen ablagern, können vor allem während Extremhochwässern wieder remobilisiert und aus dem Stauraum ausgetragen werden.

Diese Verlandung und Remobilisierung von Sedimenten in und aus Stauräumen kann am Beispiel des Stauraums Aschach verdeutlicht werden. Im Zeitraum 1965 bis 2001 ist aus den Sohlgrundvermessungen ein kontinuierlicher Anstieg des Sedimentvolumens im Stauraum zu erkennen, das sich über die Jahre zu einer Gesamtkubatur von rund 23 Mio. m<sup>3</sup> aufsummiert. Während der beiden großen Donau-Hochwasser in den Jahren 2002 und 2013 wurde ein bedeutender Anteil an Sedimenten aus dem Stauraum ausgetragen (Abbildung 34) (Habersack et al. 2015). Eine von viadonau im Oktober 2013 durchgeführte Kontrollmessung der Stauraumsohle des Kraftwerks Aschach ergab einen Gesamtaustrag von ca. 5,6 Mio. m<sup>3</sup> zwischen August 2012 und Juli 2013 (Habersack et al., 2015). Während Hochwasserereignissen werden Sedimente aber nicht nur aus Stauräumen ausgetragen, sondern es kann auch zu Anlandungen kommen oder zu Umlagerungen im Stauraum. So wurde zum Beispiel während der Hochwässer 2002 und 2013 aus dem Stauraum Aschach ausgetragenes Sediment zum Teil im nächsten Stauraum flussab (Kraftwerke Ottensheim-Wilhering) abgelagert und in den Folgejahren sukzessive ab- und weitertransportiert (siehe auch Kapitel 3.2.1).

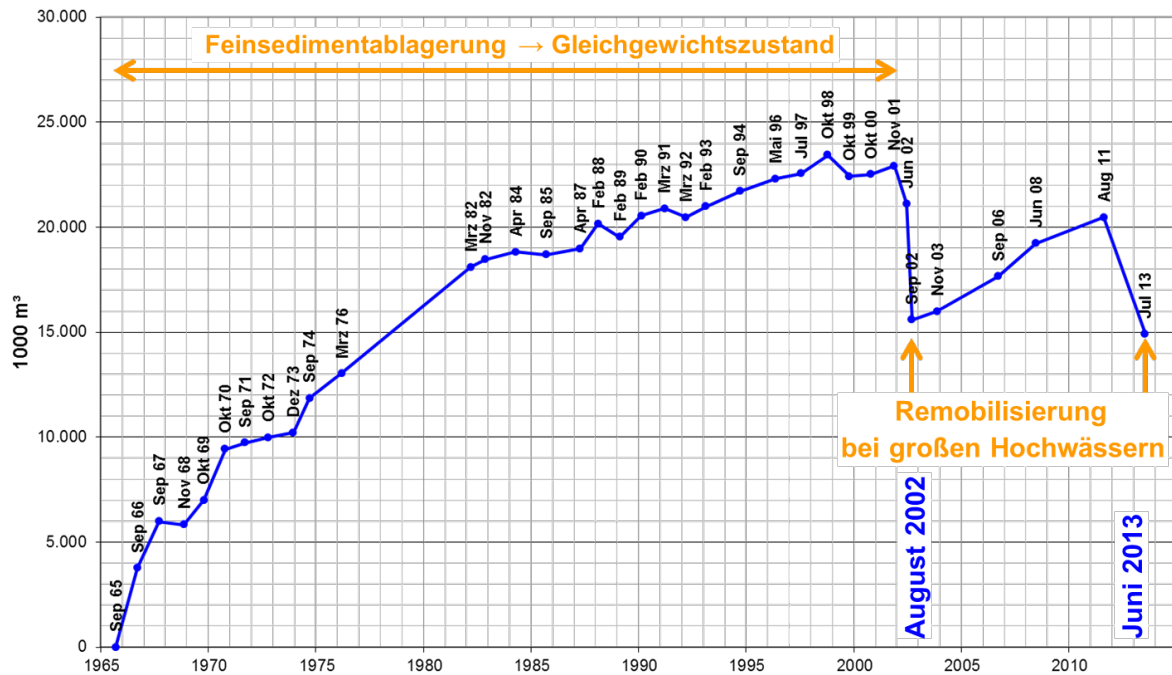


Abbildung 34. Sedimentablagerung und Remobilisierung im Stauraum Aschach 1965 bis 2013 (Habersack et al. 2015; Datenbasis: Verbund 2014)

In strömungsberuhigten Bereichen, wie etwa in Hafeneinfahrten kann es aufgrund der verringerten Fließgeschwindigkeiten zu Ablagerungen von Feinsedimenten während sedimentreichen Hochwasserereignissen kommen. Dadurch können die Häfen nur mehr eingeschränkt für den Schiffsverkehr nutzbar sein. In Einzelfällen werden Hafeneinfahrten für Schiffe unpassierbar und somit die Warenzulieferungen auf dem Wasserweg unterbunden. Diese Ablagerungen müssen entfernt werden, um eine Mindestfahrwassertiefe für die Schifffahrt und die Funktionalität der Häfen zu gewährleisten (Haimann et al., 2014).

### 3.2 Sedimentbilanzanalyse

Im Rahmen einer Sedimentbilanz (Abbildung 35) werden Ein- und Austragspfade von Sedimenten erfasst und gegenübergestellt (Reid & Dunne, 1996; Slaymaker, 2003). Die Sedimentbilanz wird laut Frings et al. (2014) nach Gleichung (1) definiert:

$$(I_u + I_t + I_a) - (O_d + O_{dr} + O_f + O_g + O_a) = \Delta S \quad (1)$$

Dabei ist  $I_u$  der Sedimenteintrag von flussauf,  $I_t$  der Sedimenteintrag von Zubringern,  $I_a$  die künstliche Sedimentzufuhr,  $O_d$  der Sedimentaustrag nach flussab,  $O_{dr}$  die Sedimententnahme durch Baggerungen,  $O_f$  die Sedimentation an Überflutungsflächen,  $O_g$  die Sedimentablagerungen in den Bühnenfeldern,  $O_a$  die Abrasion und  $\Delta S$  die Sohlhöhenänderung. Aus der Differenz zwischen Einträgen und Austrägen ergibt sich eine Änderung im Sedimentspeicher des betrachteten Systems.

Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten der Sedimentbilanz an der österreichischen Donau - soweit vorhanden - beschrieben und gemeinsam mit den Sedimenttransportdaten aus Kapitel 3.1 analysiert.

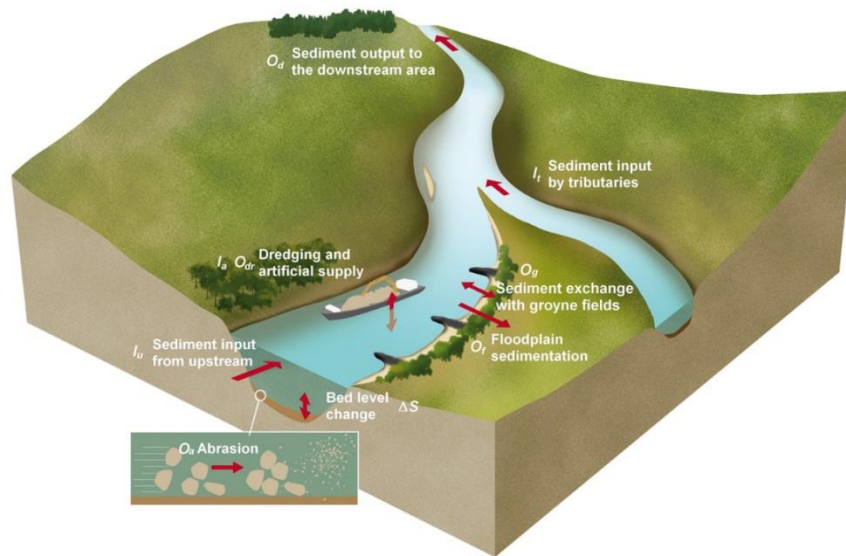


Abbildung 35. Komponenten der Sedimentbilanz an Beispiel des Rheins (Frings et al., 2014).

### 3.2.1 Sohlgrundentwicklung

#### 3.2.1.1 Kraftwerk Jochenstein

Im Vergleich zu den anderen Kraftwerken an der österreichischen Donau ist das KW Jochenstein (Strom-km 2203,33; Vollstau 1955) das einzige welches sich stromauf des KW Aschach befindet - das für das Schwebstoffregime in der Kraftwerkskette von zentraler Bedeutung ist (siehe auch Prazan, 1990 und Bock et al., 2019). Es ist daher auch das einzige, das unter dem direkten Einfluss des Schwebstoffregimes des Inns steht, der in diesem Zusammenhang an der österreichischen Donau die Hauptrolle spielt. Der Stauraum Jochenstein weist leichte Erosionstendenzen auf, allerdings fehlen im Datensatz die ersten 26 Jahre, in welchen die initiale Verlandung stattfand. Laut Schmutterer (1961) lagerten sich in den ersten Jahren nach Vollstau im mehrjährigen Mittel rund 300.000 m<sup>3</sup>/a Geschiebe im Stauraum ab. Bis 1981 wurden rund 2,8 Mio. m<sup>3</sup> Sedimente abgelagert (Prazan, 1990). In den folgenden Jahren zeigt die Stauraumentwicklung abwechselnde Phasen von Erosion und Anlandung mit einer Volumenänderung von +/- 1 Mio. m<sup>3</sup> (Abbildung 36).

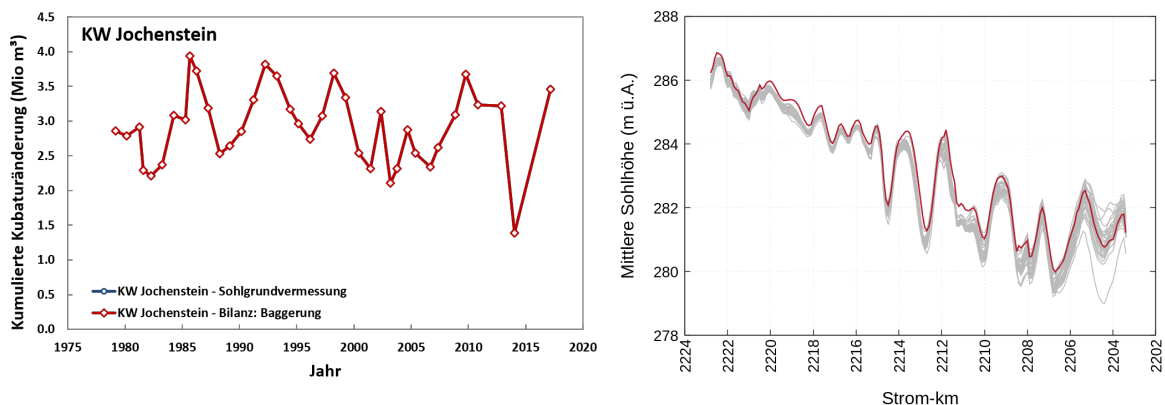
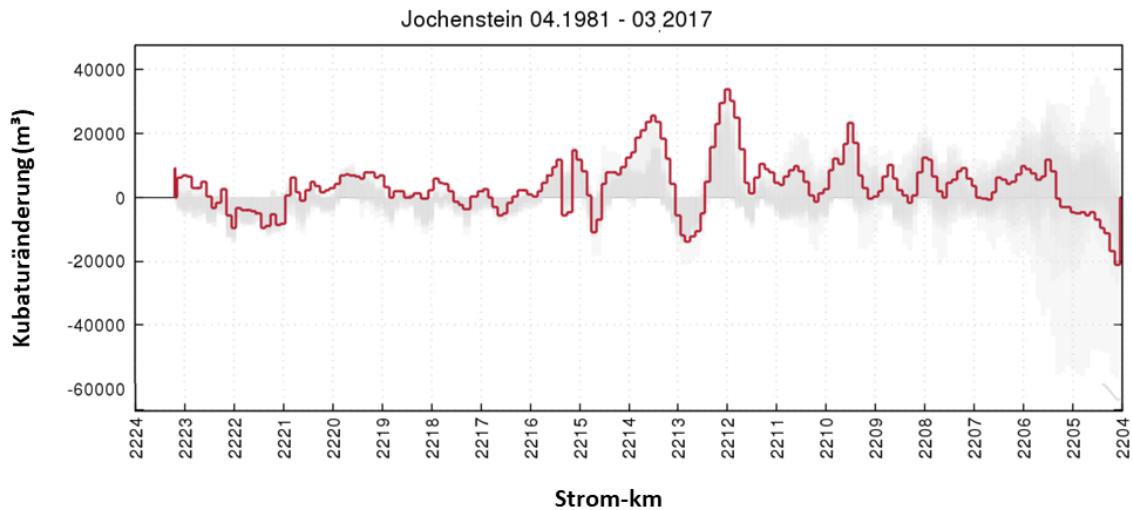


Abbildung 36. Links: Kumulierte Kubaturänderung im Stauraum Jochenstein zwischen 1981 und 2017. Rechts: Entwicklung der mittleren Sohlhöhe im Stauraum Jochenstein. Die roten Linien stellen die aktuelle Situation dar (Datengrundlage: viadonau).

Im Stauraum Jochenstein lagert sich das meiste Feinmaterial etwa 3 km stromauf des Kraftwerks ab (Abbildung 37) und nimmt flussaufwärts ab (Prazan, 1990). Im oberen Teil des Stauraums ist eine natürliche Sedimentdynamik (entweder Erosion oder Sedimentation) sichtbar. Laut Klicpera und Prazan (2000) lagern sich stromab von Strom-km 2210 langfristig nur noch Schwebstoffe ab.



**Abbildung 37. Stauraumentwicklung hinsichtlich Anlandung und Erosion (100 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1981 bis 2017. Die graue Schattierung zeigt jene Volumenänderungen an, die im Untersuchungszeitraum stattgefunden haben. Die rote Linie stellt die Situation beim Vergleich der ersten mit der letzten verfügbaren Messung dar (Datengrundlage: viadonau).**

Die Feinsedimentablagerung nimmt in Richtung Kraftwerk zu. Nach den Hochwasserereignissen in den Jahren 1985 (HQ<sub>10</sub>) und 1991 (HQ<sub>8</sub>) kommt es zu Ablagerungsprozessen mit einem stetigen Rückgang des Sedimentationsvolumens in den folgenden Jahren. Nach dem niedrigsten Sedimentationsniveau im Jahr 1996, steigt das angelandete Volumen in den darauffolgenden drei Jahren wieder an. Die Hochwasserereignisse in den Jahren 2002 und 2013 führten wiederum zu einer Remobilisierung, mit einer anschließenden Sedimentakkumulation in den Jahren nach den Ereignissen. Es scheint, dass die Feinsedimentablagerung einem "pendelnden" Gleichgewicht zwischen 2 und 3,5 Mio. m<sup>3</sup> folgt. Diese Schwankung scheint mit extremen Hochwasserereignissen, aber nicht unbedingt mit kleineren Hochwässern zusammenzuhängen (siehe auch Prazan, 1990).

### 3.2.1.2 Kraftwerk Aschach

Das KW Aschach (2162,67; Vollstau 1964) ist das größte Kraftwerk an der österreichischen Donau, in Bezug auf die Wehrhöhe, das Stauraumvolumen und die Stauraumlänge. Aschach ist die erste Wasserkraftanlage an der österreichischen Donau mit einer großen Wehrhöhe (~15,3 m), wodurch die eintretende Schwebstoffkonzentration - im Vergleich zu den anderen Stauanlagen - höher ist und der Stauraum wie ein Absetzbecken wirkt (siehe auch Klicpera und Prazan, 2000). Darüber hinaus liegt der Stauraum am stromabwärts gelegenen Ende des Engtals "Oberes Donautal", einer Durchbruchsstrecke der Donau durch das harte kristalline Gestein der Böhmisches Masse, mit einer gewundenen und mäandrierenden Grundrissform. Diese Grundrissform in Verbindung mit der markanten Reduzierung der Fließgeschwindigkeiten schafft Rückstauzonen unterhalb der Innenbögen, in denen sich erhebliche Schwebstoffmengen ablagern.



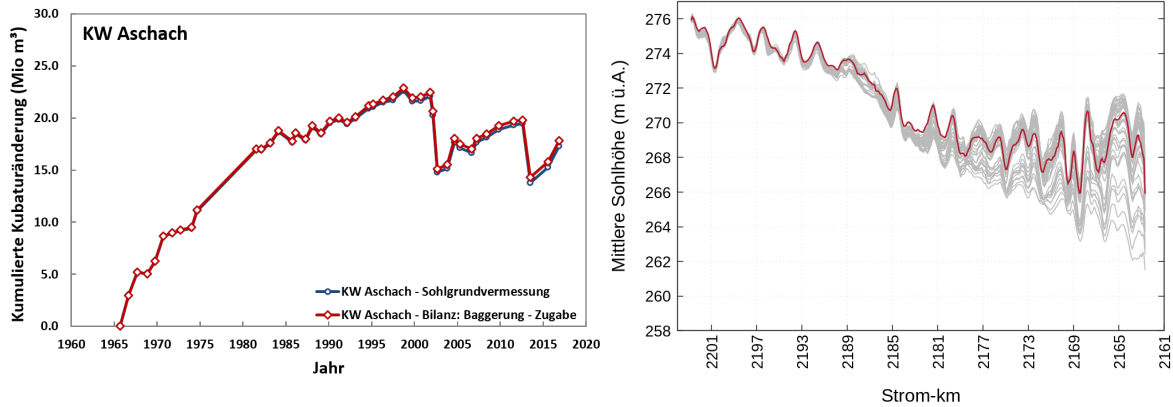


Abbildung 38. Links: Kumulierte Kubaturänderungen im Stauraum Aschach zwischen 1965 und 2016. Rechts: Entwicklung der mittleren Sohlhöhe. Die rote Linie symbolisiert die aktuelle Situation (Datengrundlage: Verbund und viadonau).

Im Stauraum Aschach befinden sich die Feinsedimentablagerungen hauptsächlich in der Nähe des Kraftwerks (ungefähr die ersten 5 km) und nehmen dann allmählich bis zu Strom-km 2183 / 2182 ab (Abbildung 38 – rechte Grafik, Abbildung 39, Abbildung 40 und Abbildung 41).

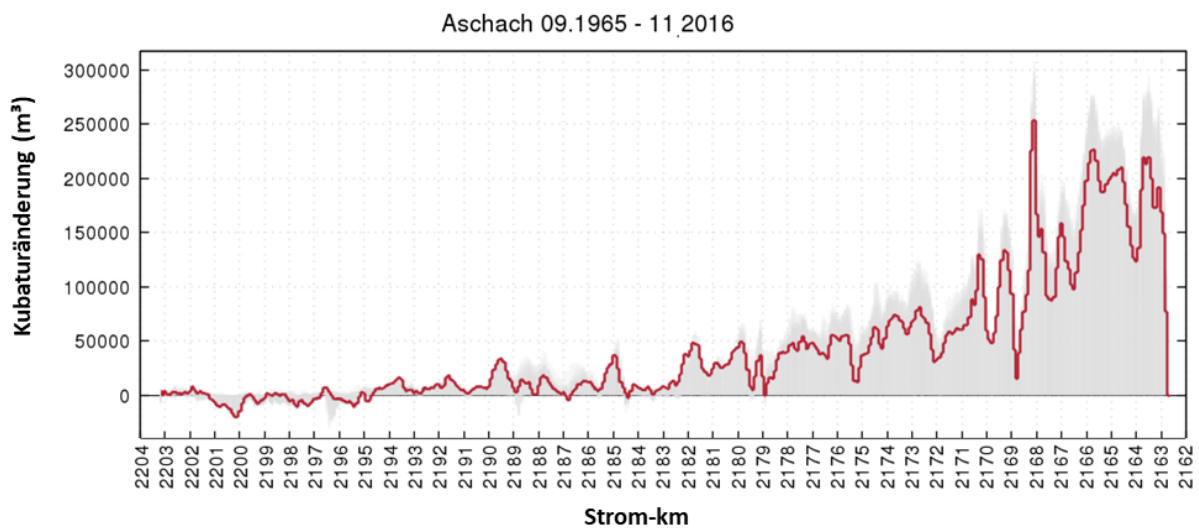


Abbildung 39. Stauraumentwicklung hinsichtlich Anlandung und Erosion (100 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1965 bis 2016 (nach den Hochwasserereignissen von 2002 und 2013). Die graue Schattierung zeigt jene Volumenänderungen an, die im Untersuchungszeitraum stattgefunden haben. Die rote Linie stellt die Situation beim Vergleich der ersten mit der letzten verfügbaren Messung dar (Datengrundlage: Verbund und viadonau).

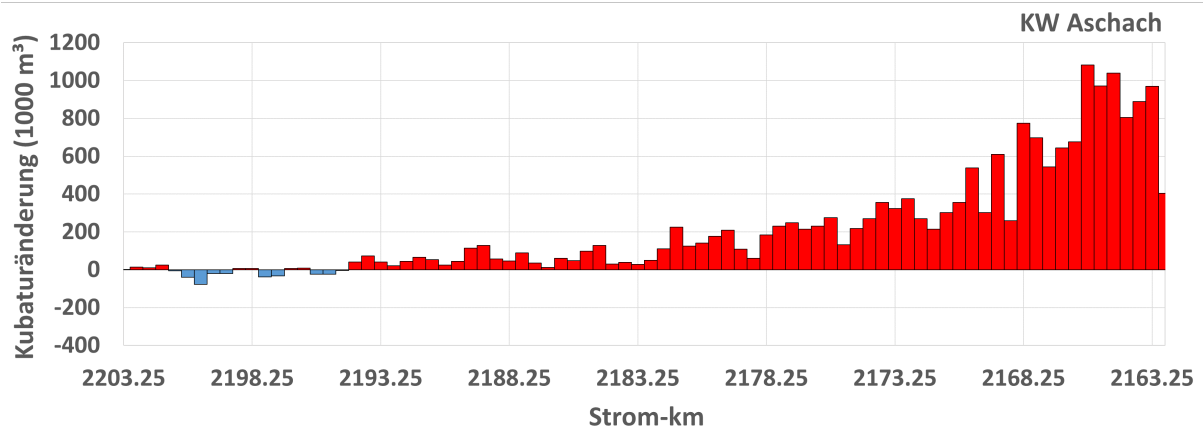


Abbildung 40. Kubaturänderungen (500 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge von 1965 bis 2016 (nach den Hochwasserereignissen von 2002 und 2013) – Sohlgrundaufnahme (Datengrundlage: Verbund und viadonau).

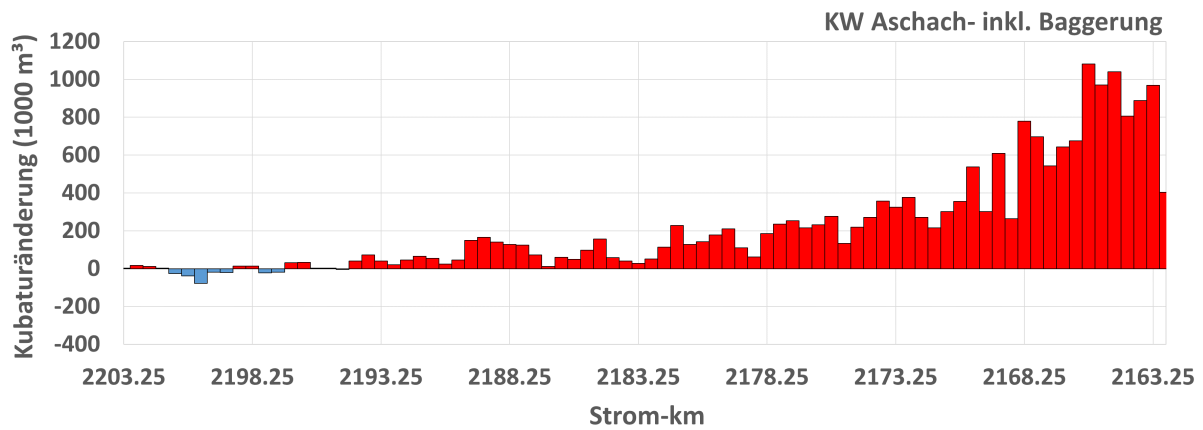


Abbildung 41. Kubaturänderungen (500 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge von 1965 bis 2016 (nach Hochwasserereignissen von 2002 und 2013) – Sohlgrundaufnahmen budgetiert mit den Baggermengen (Datengrundlage: Verbund und viadonau).

Dies bedeutet, dass sich stromab von Strom-km 2183 / 2182 langfristig nur noch Schwebstoffe ablagern. Die Höhe der Anlandungen liegt in diesem Teil des Stauraums zwischen 10 und fast 20 m. In Abbildung 42 ist die Korngrößenverteilung der abgelagerten Sedimente im unteren Drittel des Stauraums dargestellt. Sie zeigt, dass der Schluff die Hauptfraktion ausmacht, mit gleichen Anteilen an Ton und Sand (Kralik und Augustin-Gyurits, 1994).

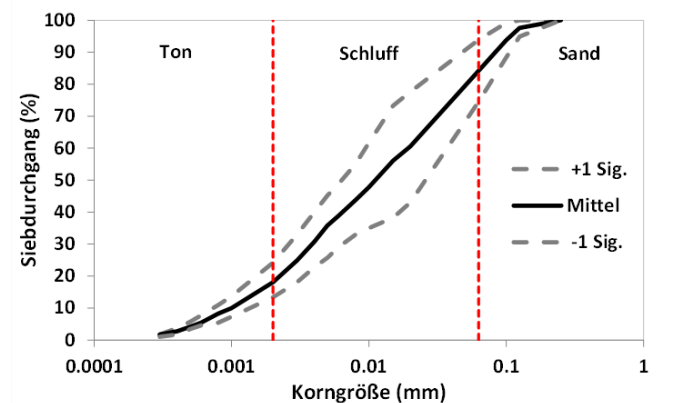
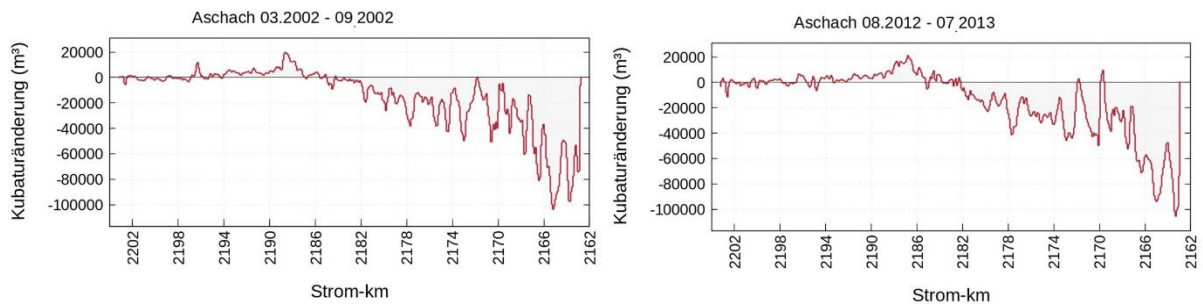


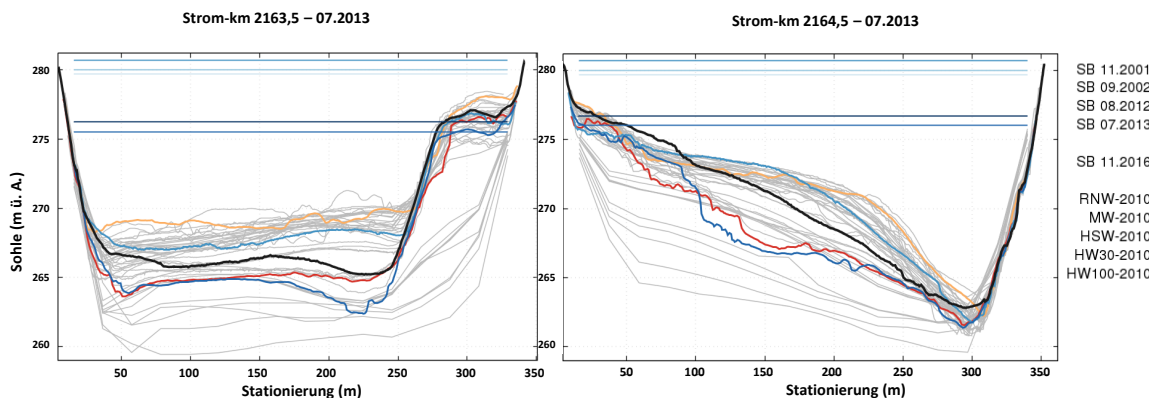
Abbildung 42. Korngrößenverteilung der abgelagerten Sedimente im unteren Drittel des Stauraums Aschach (Kralik und Augustin-Gyurits, 1994).

Die stromauf gelegenen Kiesablagerungen sind mit Feinsedimenten durchsetzt, wobei bis Strom-km 2190 sichtbare Feinsedimentanlandungen zu finden sind (Prazan, 1990). Der Stauraum Aschach weist in den ersten 20 Jahren nach Inbetriebnahme eine hohe Sedimentationsrate auf, die dann bis zum Erreichen eines Gleichgewichts bei einer Sedimentkubatur von rund 23 Mio. m<sup>3</sup> um die Jahrtausendwende abnahm (Abbildung 38 - linkes Bild). Während der beiden Hochwasserereignisse im Jahr 2002 wurden über 7 Mio. m<sup>3</sup> aus dem Stauraum remobilisiert (Abbildung 43 – linkes Bild). Diese Remobilisierung ist auf die Kombination eines großen Hochwassers mit der notwendigen Wasserspiegelabsenkung um etwa 5 m zurückzuführen (Bock et al., 2019).



**Abbildung 43. Sedimentremobilisierung infolge der beiden Hochwasserereignisse im Jahr 2002. Rechts: Sedimentremobilisierung während des Hochwassers von 2013 (Datengrundlage: Verbund und viadonau).**

Der größte Teil der Remobilisierung fand auf den ersten 9 km stromauf des Kraftwerks statt und reicht bis zu Strom-km 2182 (etwa 19 km stromauf des Kraftwerks). Im stromaufwärts befindlichen Abschnitt, wo die Donau in den engeren Teil des Durchbruchstals bei Schlögen eintritt, kam es wiederum zu Anlandungen. Nachdem sich wieder ein Gleichgewicht eingestellt hatte, begann der Verlandungsprozess erneut, wodurch sich in den folgenden Jahren bis 2012 eine Sedimentkubatur von ca. 5 Mio. m<sup>3</sup> im Stauraum ablagerte. Das Hochwasser im Juni 2013 mobilisierte über 5,5 Mio. m<sup>3</sup> und setzte das Stauraumvolumen auf das Niveau der späten 1970er Jahre zurück (VHP, 2014), wobei stromauf von Strom-km 2185 eine Anlandung von ca. 600.000 m<sup>3</sup> feststellbar ist. Die Remobilisierungs- und Anlandungsmuster sind im Allgemeinen mit den Hochwasserereignissen im Jahr 2002 vergleichbar (Abbildung 43 - rechtes Bild). Abbildung 44 zeigt beispielhaft die Sohlhöhenänderungen zweier Querprofile während der Hochwasser für den unteren Teil des Stauraums. Dabei werden Sohlhöhenänderungen von -5 bis -6 m sichtbar.



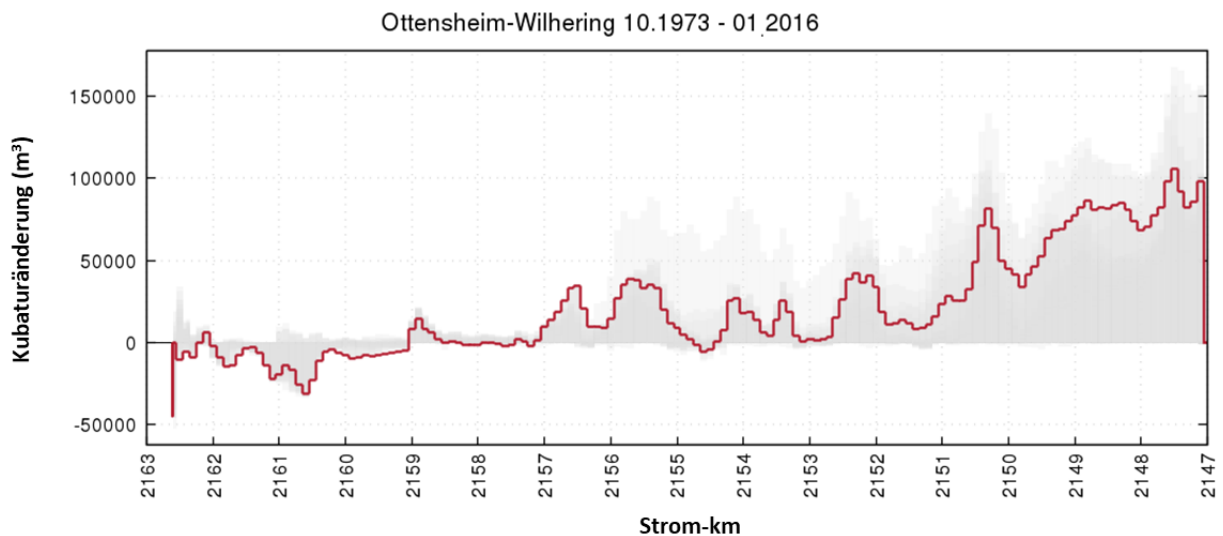
**Abbildung 44. Sohlhöhenänderungen zweier Querprofile während der Hochwasserereignisse von 2002 und 2013. Rote Linie: Sohlhöhe nach den HW-Ereignissen im Jahr 2002. Dunkelblaue Linie: Sohlhöhe nach dem Hochwasser im Jahr 2013.**

Laut BMLFUW (2015) war die Remobilisierung für rund 71% (2002) und 58% (2013) der Schwebstoffbelastung in der Donau direkt unterhalb des KW Aschach verantwortlich. Nach 2013 begann wieder eine neue Sedimentationsphase, in welcher sich in den darauffolgenden Jahren rund 3,5 Mio. m<sup>3</sup> Sedimente abgelagerten, womit sich die gesamt abgelagerte Kubatur seit Stauerrichtung auf etwa 18 Mio. m<sup>3</sup> beläuft.

Die Sedimente, die sich stromauf von Strom-km 2185 (Abbildung 43 - rechtes Bild) abgelagert haben und hauptsächlich aus dem Transport innerhalb des Stauraums stammen, wurden in den Folgejahren aus Gründen des Hochwasserschutzes ausgebaggert. Die Sedimente werden stromaufwärts transportiert und dienen zum Bau von Kiesbänken und Inseln im oberen Teil des Stauraums.

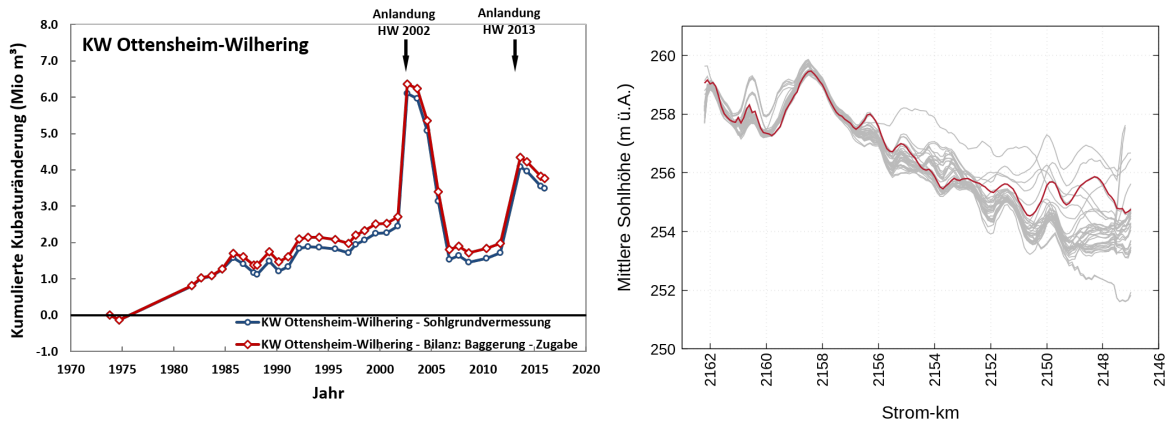
### 3.2.1.3 Kraftwerk Ottensheim-Wilhering

In Ottensheim-Wilhering (Strom-km 2146,91 / 2146,73; Vollstau 1973) setzen sich auf den ersten 4 km vom Kraftwerk bis zirka Strom-km 2151 weitgehend Schwebstoffe ab (Abbildung 45). Weiter stromaufwärts (ca. Strom-km 2155 bis 2157) findet die Sedimentation hauptsächlich in Ufernähe statt (siehe auch Prazan, 1990 und VHP, 2014).



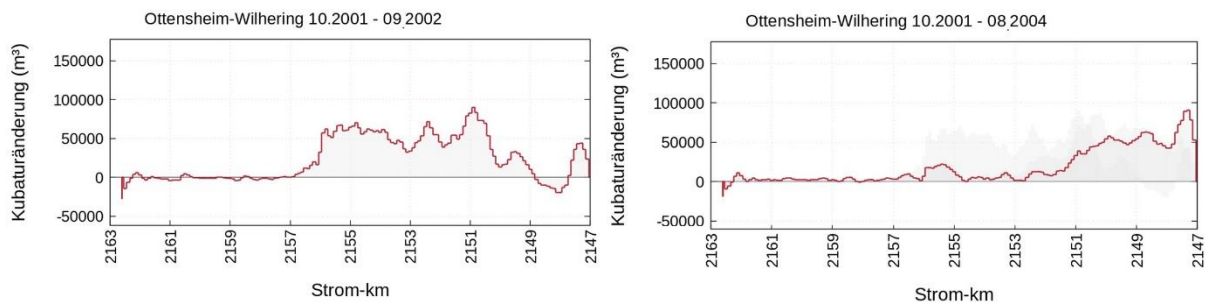
**Abbildung 45. Stauraumentwicklung hinsichtlich Anlandung und Erosion (100 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1973 bis 2016 (nach den HW-Ereignissen von 2002 und 2013). Die graue Schattierung veranschaulicht die Kubaturänderungen, die im Untersuchungszeitraum stattgefunden haben. Die rote Linie zeigt die Situation beim Vergleich der ersten mit der letzten verfügbaren Messung (Datengrundlage: Verbund und viadonau).**

Von Strom-km 2159 bis zum stromauf befindlichen KW Aschach ist eine Erosion von rund 300.000 m<sup>3</sup> sichtbar, wovon rund 250.000 m<sup>3</sup> auf das Ausbaggern einer Schotterbank (Aschacher Haufen) zurückzuführen sind. Seit der Inbetriebnahme des KW Ottensheim-Wilhering ist eine stetige Zunahme der Anlandungskubatur von ca. 2,7 Mio. m<sup>3</sup> (exklusive der Baggermenge) bis zum Jahr 2001 zu erkennen (Abbildung 46).



**Abbildung 46.** Links: Kumulierte Kubaturänderungen im Stauraum Ottensheim-Wilhering zwischen 1973 und 2016. Rechts: Entwicklung der mittleren Sohlhöhe im Stauraum Ottensheim-Wilhering zwischen 1973 und 2016. Die rote Linie zeigt die aktuelle Situation (Datengrundlage: Verbund und viadonau).

Während der Hochwasserereignisse im Jahr 2002 lagerten sich Sedimente im Ausmaß von 3,7 Mio. m<sup>3</sup> im Stauraum ab, wobei in den darauffolgenden vier Jahren das angelandete Material wieder remobilisiert wurde, und es zu einem Austrag von rund 4,6 Mio. m<sup>3</sup> kam. In der linken Grafik der Abbildung 47 ist die Anlandung nach dem Hochwasser im Jahr 2002 dargestellt. Die rechte Grafik in der Abbildung 47 zeigt die Situation zwei Jahre später und verdeutlicht, dass die Sedimente stromabwärts bis zum Kraftwerk und teilweise bereits aus dem Stauraum transportiert wurden.



**Abbildung 47.** Kubaturänderungen (100 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge direkt nach dem Hochwasser im August 2002 (linke Grafik) und zwei Jahre später (rechte Grafik). Die Darstellungen zeigen Anlandungsprozesse nach dem HW-Ereignis und die Remobilisierung und den Transport durch und zum Teil aus dem Stauraum in den darauffolgenden Jahren. Die rote Linie veranschaulicht die Situation beim Vergleich der Aufnahme vor dem HW mit der jeweiligen Aufnahme danach (Datengrundlage: Verbund und viadonau).

Während des Hochwassers im Juni 2013 lagerten sich weitere 2,4 Mio. m<sup>3</sup> im Stauraum ab, was allerdings deutlich weniger als bei den Hochwasserereignissen im Jahr 2002 ist. Auch hier erfolgt eine Remobilisierung nach dem Hochwasser. Allerdings ging diese langsamer vonstatten, wodurch im Lauf von 2,5 Jahren in etwa 0,6 Mio. m<sup>3</sup> aus dem Stauraum transportiert wurden. Insgesamt lagerten sich seit der Inbetriebnahme des Kraftwerks rund 3,7 Mio. m<sup>3</sup> ab.

### 3.2.1.4 Kraftwerk Abwinden-Asten

Das stromab der Stadt Linz gelegene KW Abwinden-Asten (Strom-km 2119,63 / 2119,45; Vollstau 1979) ist stark von früheren Baggerungen zum Hochwasserschutz beeinflusst. Die Menge der gebaggerten Sedimente übersteigt das gesamte abgelagerte Sedimentvolumen im Stauraum (Abbildung 48- linke Grafik: blaue Linie).

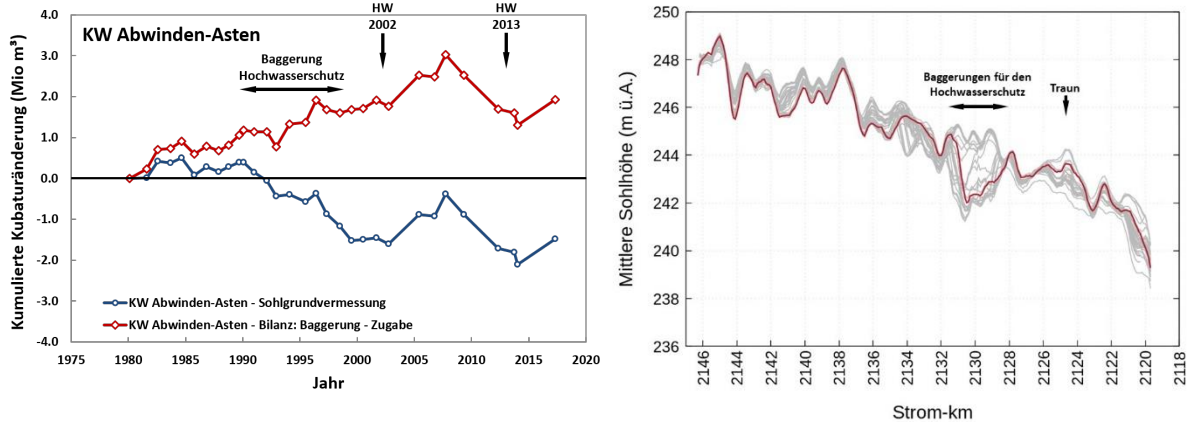


Abbildung 48. Links: Kumulierte Kubaturänderungen im Stauraum Abwinden-Asten zwischen 1980 und 2017. Rechts: Entwicklung der mittleren Sohlhöhe im Stauraum Abwinden-Asten zwischen 1980 und 2017. Die rote Linie zeigt die aktuelle Situation (Datengrundlage: Verbund und viadonau).

Das bedeutet, dass der größte Teil der Feinsedimentablagerung im Stauraum infolge der Baggerungen nicht direkt sichtbar sind, wenn man nur die Sohlgrundaufnahmen heranzieht. Mit der Traun gibt es einen Zubringer, der in den Stauraum mündet, diese weist aber vergleichsweise geringe jährliche Schwebstofffrachten auf (Jahresdurchschnitt von ca. 0,08 Mio. t zwischen 1985 und 2016). Außerdem wird der transportierte Kies durch einen Geschiebefang aufgefangen. In den 1980er Jahren wurde hauptsächlich im Bereich von Strom-km 2133 gebaggert (siehe auch Prazan, 1990). Die starke Reduktion um ca. 2,5 Mio. m<sup>3</sup> (Abbildung 49 und Abbildung 50) zwischen Strom-km 2132 und 2129 resultiert aus umfassenden Baggerungen auf Seiten der Stadt Linz, die hauptsächlich in den 1990er Jahren durchgeführt wurden, um den notwendigen Freibord für den Hochwasserschutz zu gewährleisten (siehe auch VHP, 2014). Insgesamt wurde im Stauraum Abwinden-Asten eine Sedimentkubatur von rund 3 Mio. m<sup>3</sup> durch Baggerungen entnommen. Die Sohlintiefung stromauf von Strom-km 2138 ist mehr oder weniger das Ergebnis natürlicher Erosionsprozesse, da der Fluss noch in der Lage ist, eine gewisse Menge an Kies zu transportieren (siehe auch Prazan, 1990). Sichtbar wird aber auch eine gewisse rückschreitende Erosion stromauf von Strom-km 2135, initiiert durch Baggerungen direkt stromab (siehe auch VHP, 2014).

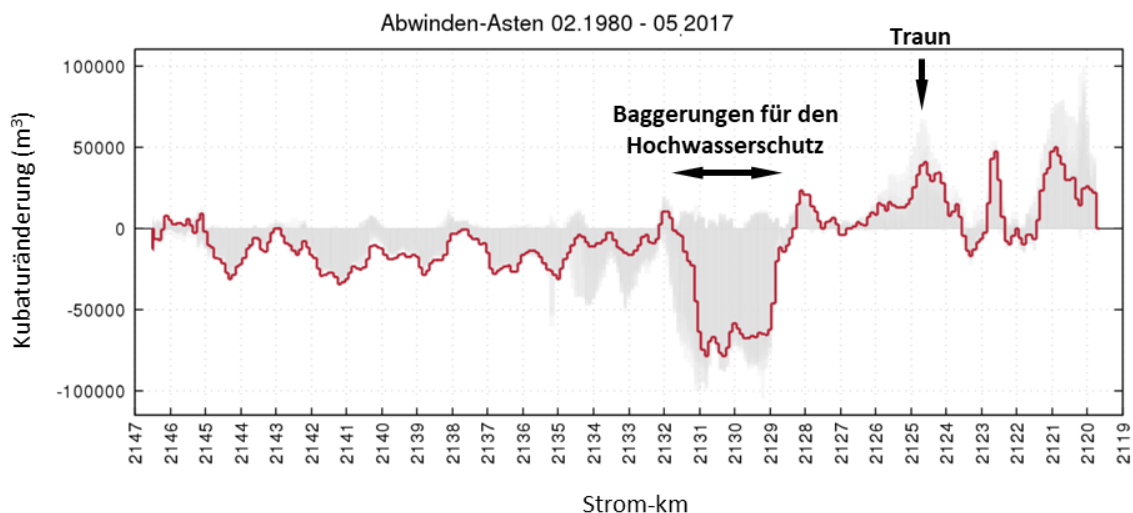


Abbildung 49. Stauraumentwicklung hinsichtlich Anlandung und Erosion (100 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1980 bis 2017 (nach den HW-Ereignissen von 2002 und 2013). Die graue Schattierung veranschaulicht die Kubaturänderungen, die im Untersuchungszeitraum stattgefunden haben. Die rote Linie zeigt die Situation beim Vergleich der ersten mit der letzten verfügbaren Messung (Datengrundlage: Verbund und viadonau).

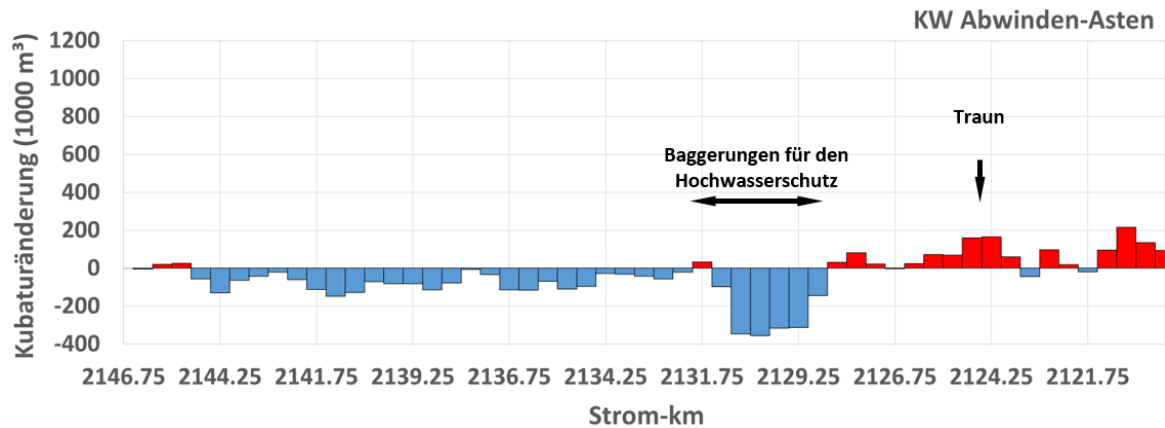


Abbildung 50. Kubaturänderungen (500 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1980 bis 2017 – Sohlgrundvermessung (nach den HW-Ereignissen 2002 und 2013) (Datengrundlage: Verbund und viadonau).

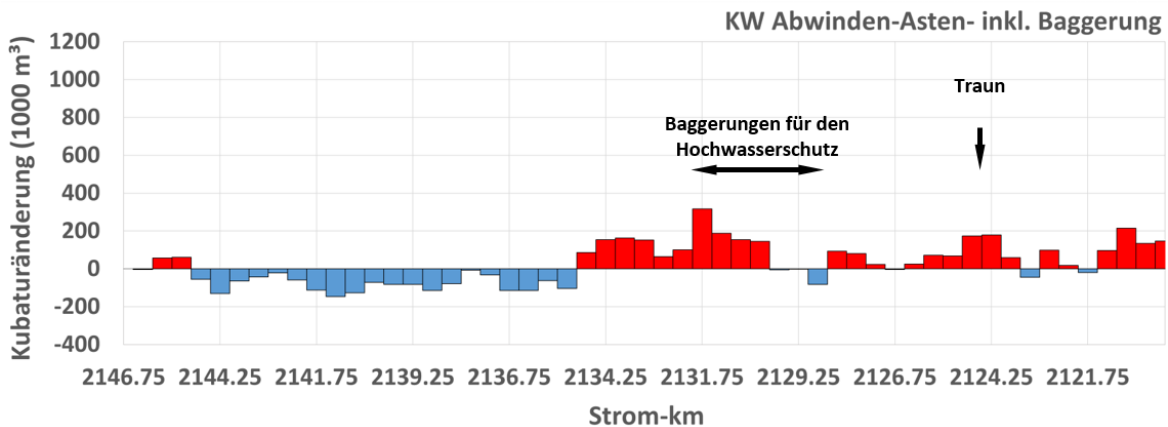


Abbildung 51. Kubaturänderungen (500 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1980 bis 2017 – Sohlgrundvermessung inklusive Baggerkubatur (nach den HW-Ereignissen 2002 und 2013) (Datengrundlage: Verbund und viadonau).

Die Feinsedimente sammeln sich hauptsächlich in der Nähe des Kraftwerks und im Mündungsbereich des Nebenflusses Traun an (Abbildung 49 und Abbildung 51). Berücksichtigt man die Baggermenge, so ist seit der Inbetriebnahme des Kraftwerks eine stetige Zunahme des Anlandungsvolumen bis zum Jahr 2001 von ca. 2 Mio. m<sup>3</sup> sichtbar (Abbildung 48 – linke Grafik: rote Linie). Die Hochwasserereignisse in den Jahren 2002 und 2013 verursachten vergleichsweise geringe Nettoveränderungen. So erfolgte 2013 die Remobilisierung von rund 500.000 m<sup>3</sup> hauptsächlich in Ufernähe und im Bereich der während des Hochwassers geöffneten Schiffsschleuse (VHP, 2014). Zusammen mit der Sedimentation im stromauf gelegenen Teil kam es bei diesem Hochwasser insgesamt zu einer Erosion von rund 100.000 m<sup>3</sup>. Bemerkenswerter ist der Sedimentationsprozess, der nach dem Hochwasser 2002 begann und Ende 2007 sein Maximum erreichte, gefolgt von einer stetigen Remobilisierung bis Ende 2012. Wahrscheinlich handelt es sich dabei um Sedimente, die sich während des Hochwassers 2002 im stromauf liegenden Stauraum Ottensheim-Wilhering ablagerten und nach dem Hochwasser remobilisiert und durch den Stauraum Abwinden-Asten transportiert wurden. Bis Ende 2017 haben sich im Stauraum Abwinden-Asten unter Berücksichtigung der Baggerungen ca. 2,9 Mio. m<sup>3</sup> Feinsedimente abgelagert. Betrachtet man die Volumsänderung rein auf Basis der Sohlgrundaufnahmen, so weist der Stauraum ein Sedimentdefizit von ca. 1,5 Mio. m<sup>3</sup> auf.

### 3.2.1.5 Kraftwerk Wallsee-Mitterkirchen

Wie beim KW Abwinden-Asten war auch der Stauraum Wallsee-Mitterkirchen (2095,62 / 2094,50; Vollstau 1968) in der Vergangenheit durch Baggerarbeiten stark beeinflusst. In diesem Fall wurden in den Jahren von 1977 bis 1980 rund 1,9 Mio. m<sup>3</sup> zwischen Strom-km 2119,5 und 2112 im Zuge der Unterwassereintiefung beim Bau des stromauf gelegenen KW Abwinden-Asten gebaggert (Abbildung 52 und Abbildung 54). Bei den restlichen Baggerungen handelt es sich überwiegend um Hochwasserschutz- bzw. Gewinnungsbaggerungen sowie Baggerungen zur Sicherstellung der Durchfahrtshöhen, die zwischen Strom-km 2112 - 2104 durchgeführt wurden (siehe auch Kobilka und Hauck, 1982 und VHP, 2014). Vor Errichtung des stromauf liegenden Kraftwerks Abwinden-Asten (Vollstau 1979) sind vor allem im Bereich der Stauwurzel (Strom-km 2009 bis 2103) größere Geschiebeablagerungen zu beobachten (1970 zirka 300.000 m<sup>3</sup> und 1975 zirka 400.000 m<sup>3</sup>) (Kobilka und Hauck, 1982), die durch Baggerungen wieder entfernt wurden. Auch in diesem Stauraum übertrifft die Menge des entnommenen Materials das gesamte akkumulierte Sedimentvolumen im Stauraum (Abbildung 52 - linke Grafik: blaue Linie). Das bedeutet, dass der größte Teil der Feinsedimentablagerungen im Stauraum - insbesondere in der Nähe der Ennsmündung – infolge der Baggerarbeiten nicht zu sehen sind.

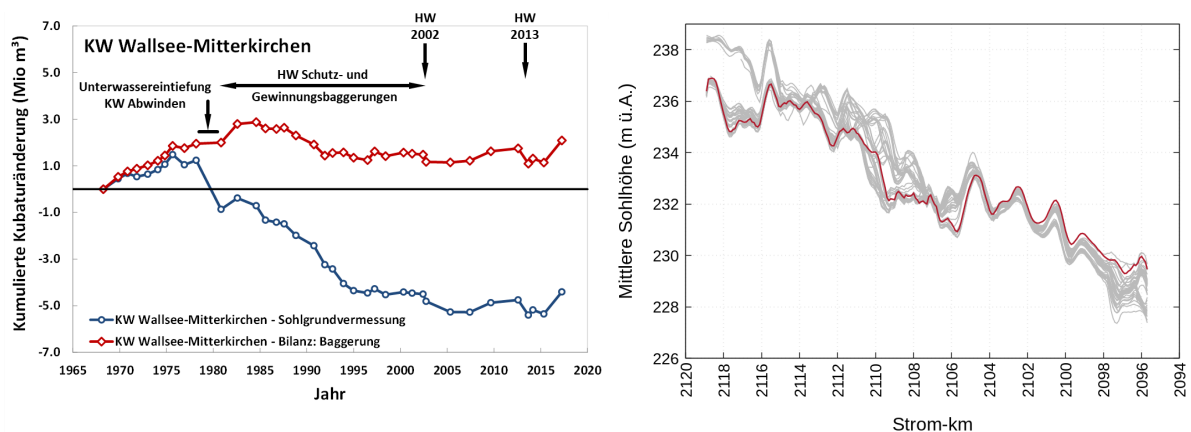


Abbildung 52. Links: Kumulierte Kubaturänderung im Stauraum Wallsee-Mitterkirchen in den Jahren 1968 bis 2017. Rechts: Entwicklung der mittleren Sohlhöhe im Stauraum Wallsee-Mitterkirchen in den Jahren 1968 bis 2017. Die rote Linie repräsentiert die aktuelle Situation (Datengrundlage: Verbund und viadonau).

Weiters mündet die Enns in den Stauraum, die aber im Vergleich zur Donau eine eher geringe jährliche Schwebstoffbelastung aufweist (Jahresdurchschnitt von ca. 0,30 Mio. t zwischen 1985 und 2016). Vor dem Bau der Kraftwerkskette (das KW Staining wurde 1946 als erstes in Betrieb genommen) war die Enns - neben dem Inn - einer der wichtigsten Geschiebezubringer (siehe z.B. Rosenauer, 1947). Die Ennsmündung wird heute durch den Rückstau des KW Wallsee-Mitterkirchen beeinflusst. Darüber hinaus gelangen nach dem Ausbau des Ennshafens, der als zusätzliche Sedimentfalle fungiert, wenn überhaupt nur noch geringe Kiesmengen in den Stauraum (VERBUND, 1998). Laut Dieplinger (2010 - in Zauner et al. (2011)) wurden in diesem Abschnitt der Enns rund 1 Mio. m<sup>3</sup> Kies gebaggert. Ansonsten wurden seit den 1970er Jahren nur noch Feinsedimente vor allem zur Erhaltung der Fahrwassertiefe im Ennshafen entnommen.

Berücksichtigt man die Baggerkubatur, so ist bevor 1976 mit dem Bau des stromauf gelegenen KW Abwinden-Asten begonnen wurde ein Anlandungstrend mit einem Akkumulationsvolumen von ca. 1,8 Mio. m<sup>3</sup> bis Ende 1975 erkennbar (Abbildung 52 – linke Grafik: rote Linie). Die wesentlichen Sedimentablagerungen fanden auf den ersten 2-3 km stromauf des Kraftwerks und im Bereich der



Stauwurzel in einem breiteren Flussabschnitt (Strom-km 2112 bis 2109,5) stromab der Ennsmündung statt (Abbildung 53 und Abbildung 55). Die Anlandungen in diesem breiteren Abschnitt sind in Abbildung 53 aufgrund von Gewinnungs-baggerungen in diesem Bereich des Stauraums nicht mehr sichtbar. Seit Anfang bzw. Mitte der 1990er Jahre bleibt das Sedimentationsvolumen auf einem nahezu konstanten Niveau.

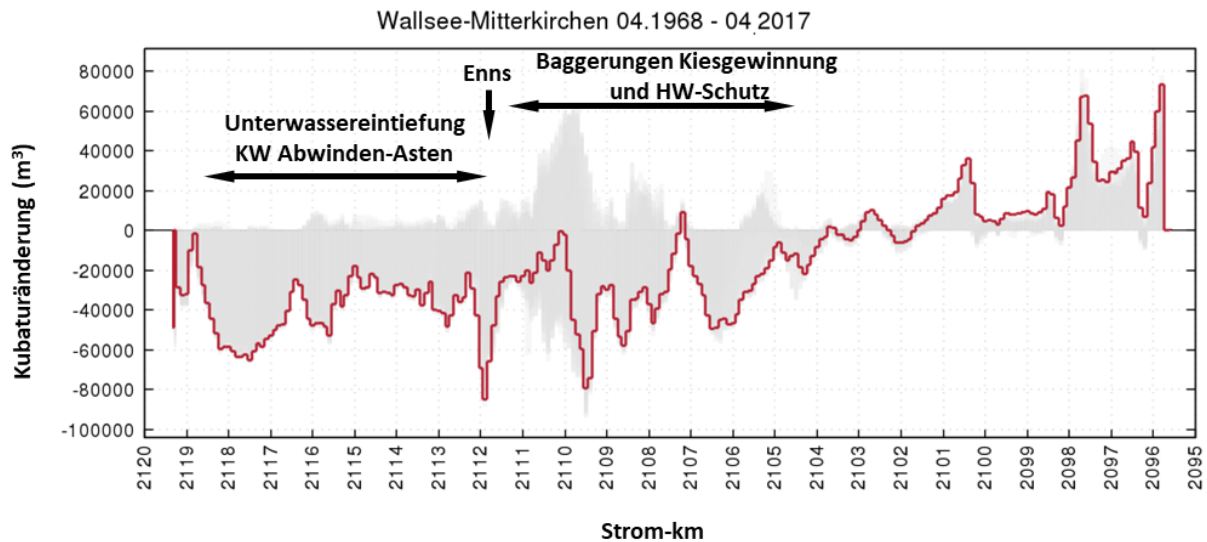


Abbildung 53. Stauraumentwicklung hinsichtlich Anlandung und Erosion (100 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1968 bis 2017 (nach den HW-Ereignissen von 2002 und 2013). Die graue Schattierung zeigt die Kubaturänderungen, die im Untersuchungszeitraum stattgefunden haben. Die rote Linie repräsentiert die Situation beim Vergleich der ersten mit der letzten verfügbaren Aufnahme (Datengrundlage: Verbund und viadonau).

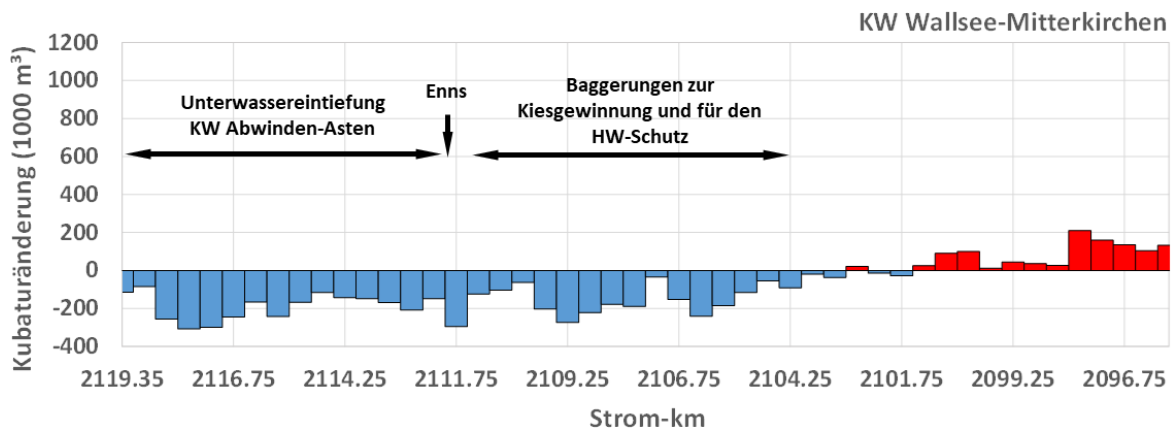


Abbildung 54. Kubaturänderungen (500 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1968 bis 2017 – Sohlgrundvermessung (nach den HW-Ereignissen von 2002 und 2013) (Datengrundlage: Verbund und viadonau).

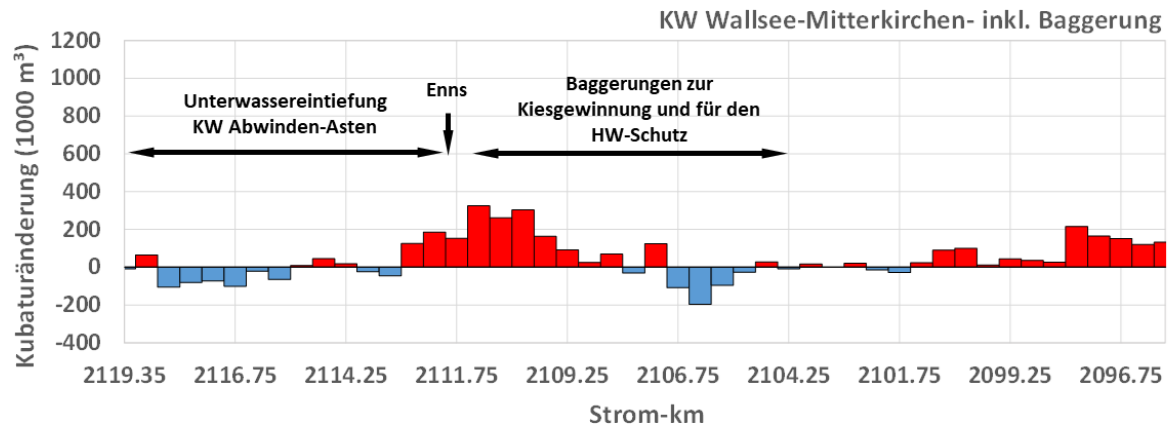


Abbildung 55. Kubaturänderungen (500 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1968 bis 2017 – Sohlgrundvermessung inkl. Baggerkubaturen (nach den HW-Ereignissen von 2002 und 2013) (Datengrundlage: Verbund und viadonau).

Die Hochwasserereignisse in den Jahren 2002 und 2013 führten zu einer Remobilisierung von etwa 0,4 bis 0,6 Mio. m<sup>3</sup>, die überwiegend in der Nähe des Kraftwerks stattfand (2013 wurden die Schiffsschleusen geöffnet).

Im Stauwurzelbereich des KW Wallsee-Mitterkirchen kommt es – wie auch im stromauf gelegenen KW Abwinden-Asten – zu Sohleintiefungen. Dies ist besonders im engeren Abschnitt zwischen Strom-km 2118 und 2116 sichtbar, wo Erosionsprozesse seit Inbetriebnahme des Kraftwerks vorherrschen (Abbildung 52). Basierend auf den Sohlgrundvermessungen weist der Stauraum ein Sedimentdefizit von etwa 4,4 Mio. m<sup>3</sup> auf. Unter Einbeziehung der Baggerdaten wurden seit Inbetriebnahme des Kraftwerks rund 2,1 Mio. m<sup>3</sup> Sedimente im Stauraum abgelagert.

### 3.2.1.6 Kraftwerk Ybbs-Persenbeug

Das KW Ybbs-Persenbeug (Strom-km 2060,42; Vollstau 1958) ist das zweitälteste Kraftwerk an der österreichischen Donau (1958 in Betrieb genommen) und liegt mehr oder weniger in der Mitte des österreichischen Donauabschnitts. Durch dessen Errichtung wurde der Geschiebetransport erheblich gestört. Bis zur Inbetriebnahme des KW Wallsee-Mitterkirchen betrug die Entfernung zum nächsten stromauf befindlichen Donaukraftwerk rund 143 km (Gruber, 1969). Im Stauraum Ybbs-Persenbeug befindet sich der enge Durchbruchabschnitt des Strudengaus.

In den ersten Jahren nach der Stauerrichtung lagen keine Sohlgrundvermessungen vor. Schmutterer (1961) gibt für das Jahr 1959 (erstes Jahr nach Inbetriebnahme) ein Geschiebeablagerungsvolumen von rund 457.000 m<sup>3</sup> an. Kobilka und Hauck (1982) untersuchten die Sedimentation im Stauraum und kamen zu dem Schluss, dass sich in den ersten vier Jahren (1958 bis 1962) basierend auf Stromgrundaufnahmen rund 1,4 Mio. t (~0,8 Mio. m<sup>3</sup>) Geschiebe im Stauraum ablagerten. Zusätzliche 0,47 Mio. m<sup>3</sup> wurden 1960 und 1961 laut Kobilka und Hauck (1982) jedoch schon gebaggert, d.h. bei Hinzurechnung dieser Kubatur lag der Eintrag in den vier Jahren bei rund 0,32 Mio. m<sup>3</sup>/a. Laut Tschochner (1964) wurden in den Jahren 1960 und 1961 sogar ein Volumen von 750.000 m<sup>3</sup> Kies aus dem Stauraum Ybbs-Persenbeug durch Baggerungen entfernt. Schmutterer (1961) stellte hinsichtlich des Geschiebetransports im Stauraum fest, dass beim doppelten Mittelwasserabfluss Geschiebe im Stauraum transportiert wird und der Geschiebetransport durch die Wehranlage des Kraftwerks eher gering sein dürfte. Dies zeigt sich auch anhand der Absenkung des Niederwasserspiegels infolge Strömungserosion im Unterwasser, die laut Kobilka und Hauck (1982) zwischen 1957 und 1975 rund 1,1 m betrug. Da die geplante Absenkung des Niederwasserspiegels

um 1,5 m trotz Sprengung einer Felsbarriere nicht erreicht wurde, erfolgte eine künstliche Unterwassereintiefung mit einer Baggerkubatur von rund 1,2 Mio m<sup>3</sup> in den Jahren des Baus des KW Melks (Baubeginn 1979) (Kobilka und Hauck, 1982).

Feinsedimentablagerungen treten vor allem im unteren Drittel des Stauraums, in der Nähe des Kraftwerks auf (siehe auch Prazan, 1990; VHP, 2014). Die deutlich sichtbaren Anlandungen zwischen Strom-km 2171,5 und 2169 bestehen hauptsächlich aus Kies der Donausohle und sind auf eine Zunahme der Flussbreite bzw. auf den Rückstauereffekt des Kraftwerks zurückzuführen (Abbildung 56).

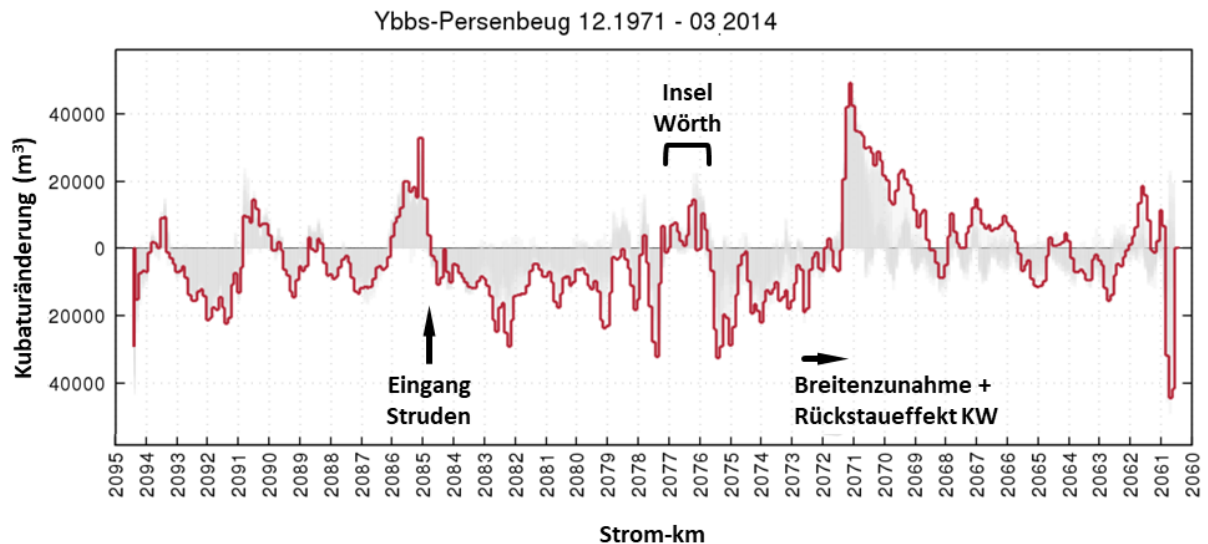


Abbildung 56. Stauraumentwicklung hinsichtlich Anlandung und Erosion über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1971 bis 2014. Die graue Schattierung zeigt die Kubaturänderungen, die im Untersuchungszeitraum aufgetreten sind. Die rote Linie repräsentiert die Situation beim Vergleich der ersten mit der letzten verfügbaren Aufnahme (Datengrundlage: Verbund).

Im Bereich der engsten Stelle des Strudens kommt es zur Sohleintiefung. Hier wird noch immer Kies mobilisiert und stromab in den Stauraum transportiert wird. Während des Hochwassers im Jahr 2013 kam es hauptsächlich in den ersten 10 km stromauf des Kraftwerks zu einer Ablagerung von rund 480.000 m<sup>3</sup>. Insgesamt sind die Sedimentationsvolumina seit der Inbetriebnahme des KW Ybbs-Persenbeug aber eher gering (Abbildung 57).

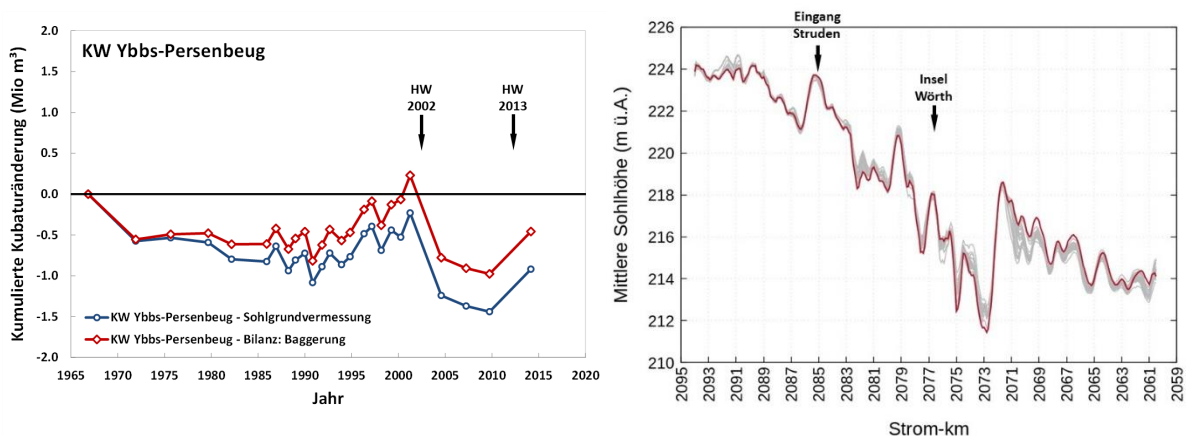


Abbildung 57. Links: Kumulierte Kubaturänderung im Stauraum Ybbs-Persenbeug in den Jahren 1966 bis 2014. Rechts: Entwicklung der mittleren Sohlhöhe im Stauraum Ybbs-Persenbeug zwischen 1966 und 2014. Die rote Linie zeigt die aktuelle Situation (Datengrundlage: Verbund).

### 3.2.1.7 Kraftwerk Melk

Der Stauraum Melk (Strom-km 2037,96 / 2038,16; Vollstau 1982) weist nur geringe Feinsedimentablagerungen auf (Abbildung 58). Das Sedimentdefizit zwischen Strom-km 2059 und 2053 ist hauptsächlich auf die Kiesbaggerungen zurückzuführen (Abbildung 59, Abbildung 60 und Abbildung 61). Laut VHP (2014) wurden während des Hochwassers im Jahr 2013 die meisten Ablagerungen in Kraftwerksnähe remobilisiert (ca. 250.000 m<sup>3</sup>), was auf die geöffneten Wehrfelder und Schiffsschleusen zurückzuführen ist. Unter Einbeziehung der Baggerkubaturen ist die Nettosedimentation seit Inbetriebnahme des Kraftwerks nahezu null.

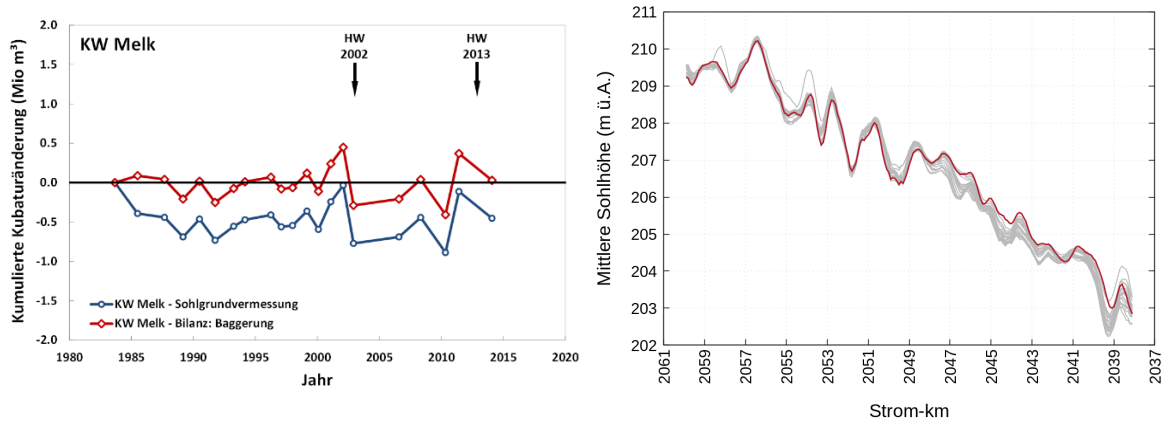


Abbildung 58. Links: Kumulierte Kubaturänderung im Stauraum Melk zwischen 1983 und 2014. Rechts: Entwicklung der mittleren Sohlhöhe im Stauraum Melk zwischen 1983 und 2014 (Datengrundlage: Verbund).

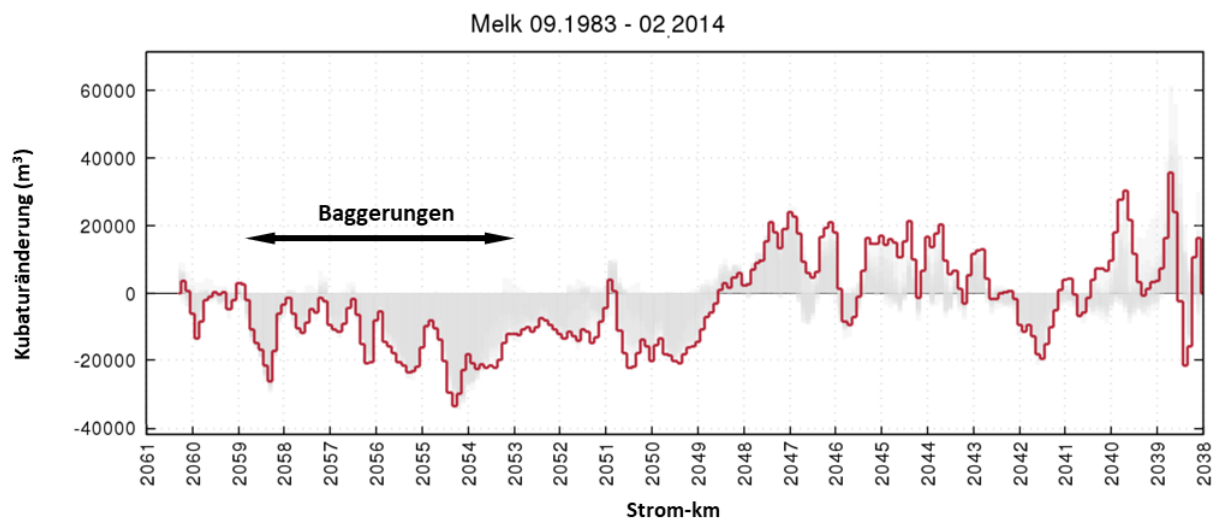


Abbildung 59. Stauraumentwicklung hinsichtlich Anlandung und Erosion (100 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1983 bis 2014. Die graue Schattierung zeigt die Kubaturänderungen, die im Untersuchungszeitraum stattgefunden haben. Die rote Linie repräsentiert die Situation beim Vergleich der ersten mit der letzten verfügbaren Aufnahme (Datengrundlage: Verbund).

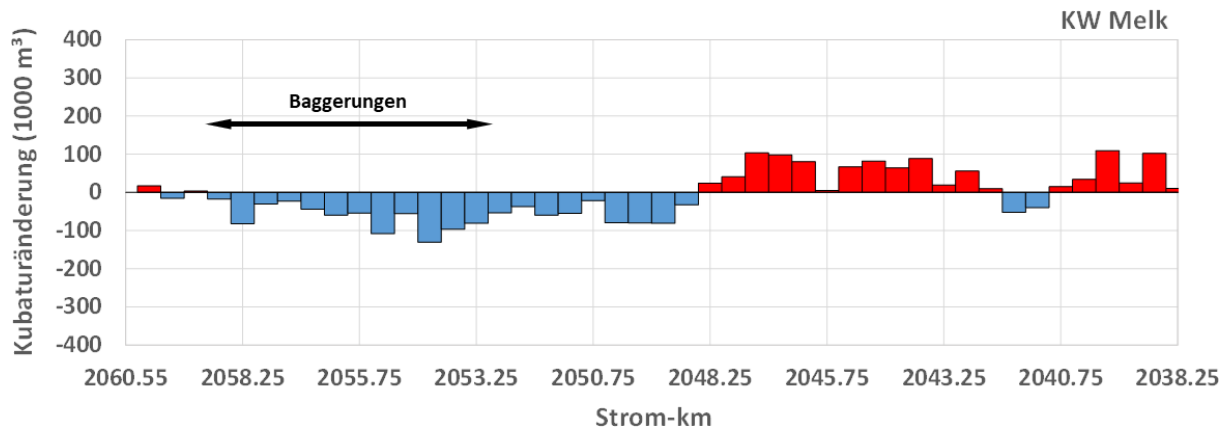


Abbildung 60. Kubaturänderungen (500 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1983 bis 2014 – Sohlgrundvermessung (Datengrundlage: Verbund).

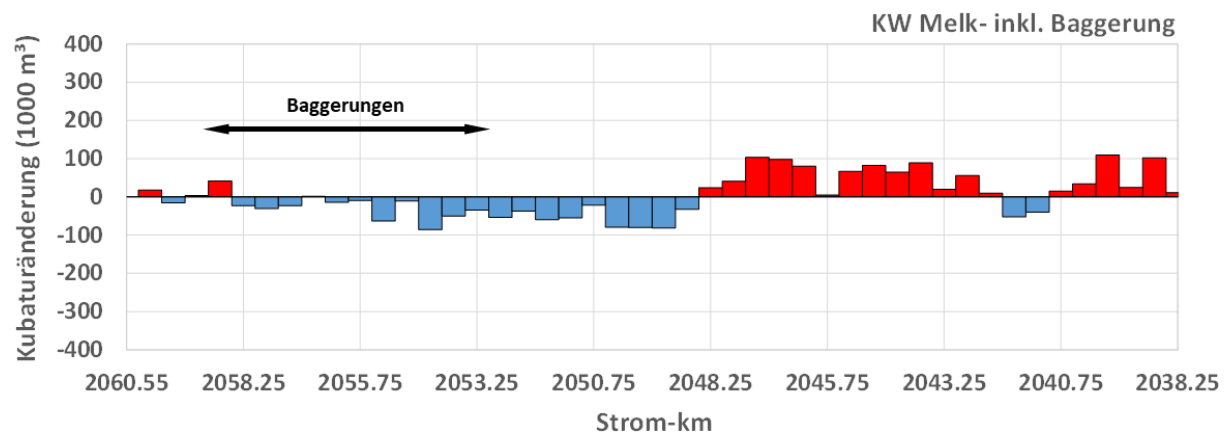
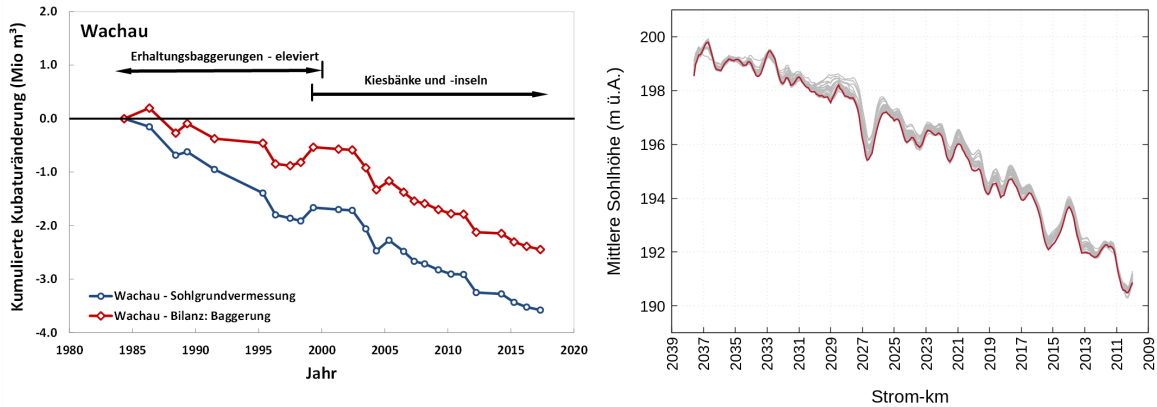


Abbildung 61. Kubaturänderungen (500 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1983 bis 2014 – Sohlgrundvermessung inkl. Baggerkubaturen (Datengrundlage: Verbund).

### 3.2.1.8 Wachau

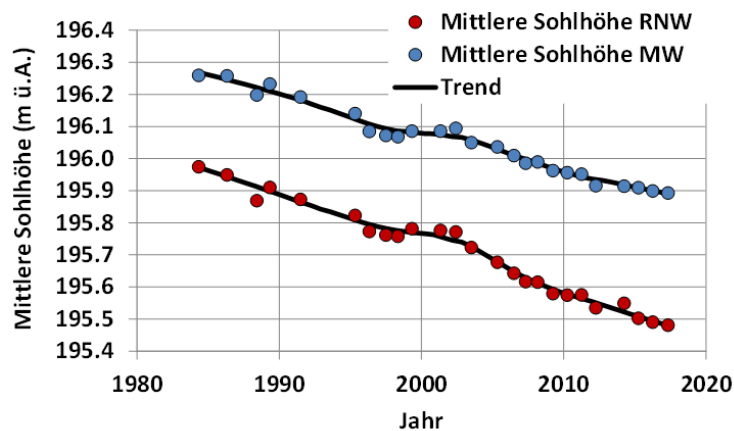
Die Wachau ist eine der beiden verbleibenden freien Fließstrecken in der österreichischen Donau und liegt hauptsächlich in einem Durchbruchstal der Donau. Sie unterscheidet sich somit auch grundlegend von der zweiten freien Fließstrecke Östlich von Wien, welche in einer Beckenlage (Wiener Becken) liegt in der die Donau durch das postglaziale Alluvium fließt und auch eine potentiell größere Flussbreite hat. Im Vergleich zu den Beckenabschnitten, in denen die Donau einer Vielzahl an morphologischen Prozessen unterworfen war, waren die Durchbruchsabschnitte auf Grund der natürlich limitierten Flussbreite eher Sedimenttransferzonen. Dementsprechend ist auch der Sedimentspeicher in der Wachau geringer, mit lokal hochanstehendem Fels. Gemäß dem geologischen Längenschnitt in Schmautz et al. (2000), welcher auf Aufschlussbohrungen der Österreichischen Donaukraftwerke AG in der Wachau basiert, findet sich vor allem im Bereich zwischen Strom-km 2029 und 2035 eine im Vergleich zur Stromsohle hoch anstehende Felsoberkante. In diesem Bereich befinden sich auch die zwei im Strom stehenden Felsen ‚Kuh und Kalb‘ (zirka Strom-km 2031,7), welche laut DANUBE parks CONNECTED (2021) die einzigen verbliebenen Felsinseln in der gesamten Donau sind. Vor der Flussregulierung waren der obere und untere Teil der Wachau durch etwas breitere Abschnitte gekennzeichnet. Neben den Regulierungsarbeiten kam es zu einer weiteren Beeinflussung der Strecke durch den Bau des KW

Melk (Vollstau 1982) mit den anschließenden Baggerungen für die Unterwassereintiefung, bei der laut Prazan (1990) auch Fels angeschnitten wurde, sowie durch die Erhaltungsbaggerungen für die Binnenschifffahrt. Im Vergleich zur freien Fließstrecke östlich von Wien finden stromab des Kraftwerks keine Kieszugaben zur Sohlstabilisierung statt. Wie in Abbildung 62 (rechte Grafik) erkennbar, ist die Stromsohle in diesem Abschnitt geprägt von einer sukzessiven Erosion.



**Abbildung 62.** Links: Kumulierte Kubaturänderungen in der freien Fließstrecke Wachau zwischen 1984 und 2017 von Strom-km 2038 bis 2010. Rechts: Entwicklung der mittleren Sohlhöhe in der freien Fließstrecke Wachau zwischen 1984 und 2017. Die rote Linie repräsentiert die aktuelle Situation (Datengrundlage: viadonau).

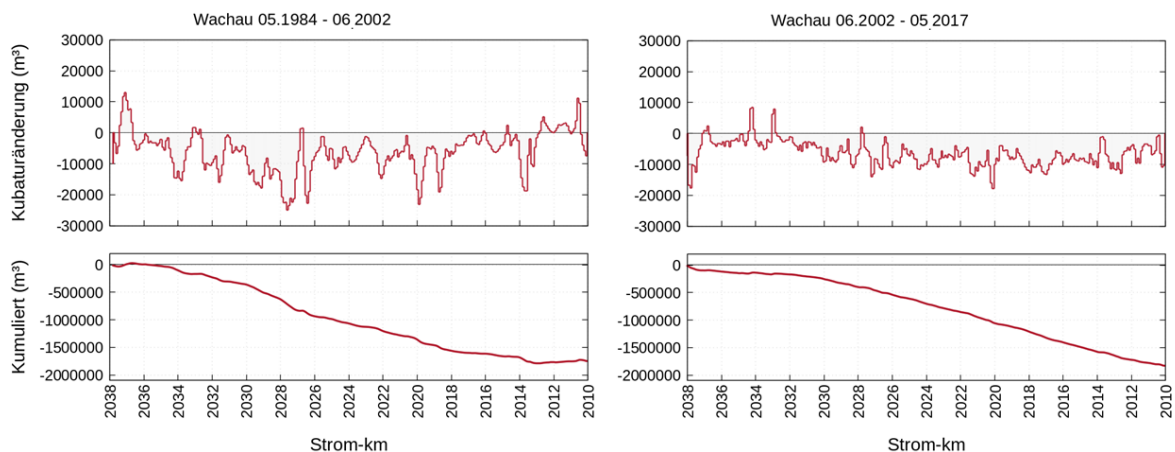
Ende der 1990er Jahre wurde im Rahmen von ökologisch motivierten Renaturierungsprojekten mit der Wiederherstellung gewässertypischer Strukturen begonnen. Bis 2014 waren Kiesbänke und -inseln mit einer Länge von 6,5 km und Nebenarme mit einer Länge von 8,5 km das Ergebnis dieser Projekte, wobei die Arbeiten von viadonau in diesem Bereich bis heute andauern (Zauner et al., 2016). Ein Ergebnis dieser Renaturierungsmaßnahmen im Hinblick auf das Sedimentregime war, dass die gebaggerten Sedimente nicht mehr aus der Donau entnommen, sondern zum Bau der bereits erwähnten morphologischen Strukturen verwendet wurden. Hinsichtlich der in der Wachau auftretenden Sohlhöhenänderungen, eine sukzessive Eintiefung zu beobachten (Abbildung 63). Unterbrochen wird dieser Prozesse nur von einem sichtbaren Rückgang zwischen Mitte 1990er und Anfang 2000er Jahre (zirka 1995 bis 2002), sowie einem leichten Rückgang in den letzten Jahren (zirka ab 2015).



**Abbildung 63.** Entwicklung der mittleren Sohlhöhe in der Wachau (Strom-km 2038 bis 2010) bis 2017. Rote Punkte: Mittleres Sohlniveau unterhalb RNW-Anschlagslinie; blaue Punkte: Mittleres Sohlniveau unterhalb der MW-Anschlagslinie. Die schwarze Linie zeigt den Gesamttrend nach Glättung (Datengrundlage: viadonau).

Betrachtet man die Entwicklung der Regulierungsniederwasserspiegel (RNW) gemäß der Kennzeichnenden Wasserstände der österreichischen Donau (KWD) so errechnet sich zwischen Strom-km 2037,86 und 2010 eine Eintiefungsrate von rund -1,5 cm/a im Vergleich von KWD 1985 mit KWD 1996. Vergleicht man die KWD 1996 mit den KWD 2010 so liegt die Eintiefungsrate für RNW bei rund -1,2 cm/a, für die Strecke von Strom-km 2037,86 bis 2010. Der charakteristische Durchfluss bei RNW liegt für die KWD 1996 bei 870 m<sup>3</sup>/s und die KWD 2010 bei 930 m<sup>3</sup>/s am Pegel Kienstock (Strom-km 2015,21). Für einen Vergleich wurden daher die RNW Wasserspiegellagen der KWD 2010 basierend auf der Wasserstands-Durchflussbeziehung am Pegel Kienstock um 0,1 m reduziert, um beide KWDs auf den gleichen Durchfluss zu beziehen.

Das Sedimentdefizit für den gesamten Zeitraum von 1984 bis 2017 von Strom-km 2038 bis 2010 liegt im Bereich von 100.000 bis 110.000 m<sup>3</sup>/a (rund -1,5 cm/a), basierend auf den Sohlgrundaufnahmen. Dieser Wert ist dabei nicht konstant über die Jahre, sondern schwankt je nach betrachtetem Zeitraum (z.B. Rückgang in den Jahren 1995 bis 2002 oder auch in den letzten Jahren). Dieser Wert ist auch vergleichbar mit der Bilanzierung von VERBUND (2013a), der basierend auf Sohlgrundaufnahmen und Baggerkubaturen im Bereich der Kompensationsbaggerungen im Raum Stein-Krems, einen Austrag aus der Wachau in die Stauwurzel des KW Altenwörths von 113.000 m<sup>3</sup>/a über einen Zeitraum von 15 Jahren (1997 bis 2012) ermittelte. Schmautz et al. (2000) geben für den Zeitraum von 1994 bis 1999 für eine kürzere Strecke (Strom-km 2038 bis Strom-km 2020) einen Austrag rund 40.000 m<sup>3</sup>/a an. Dieser Rückgang des Sedimentdefizits zeigt sich auch in den kumulierten Kubaturänderungen (zirka Jahre von 1995 bis 2002) in Abbildung 62 (linke Grafik), welche den Abschnitt zwischen Strom-km 2038 und 2010 darstellen. Ein Rückgang des Sedimentdefizits, wenn auch noch nicht so klar sichtbar wie zwischen 1995 und 2002, ist in den letzten Jahren (ungefähr seit 2015) zu beobachten.



**Abbildung 64.** Oben: Entwicklung hinsichtlich Anlandung und Erosion (100 m Abschnitte) über die gesamte freie Fließstrecke von 1984 bis 2002 (links) bzw. von 2002 bis 2017 (rechts). Die rote Linie zeigt die Situation beim Vergleich der jeweiligen Messungen. Unten: Kumulierte Sohl-speicheränderung von 1984 bis 2002 (links) und 2002 bis 2017 (rechts) von Strom-km 2038 bis 2010. Dargestellt ist die Sohl-speicheränderung basierend auf den Sohlgrundaufnahmen, d.h. ohne Berücksichtigung der Baggerungen (Datengrundlage: viadonau).

Dies deckt sich auch mit den stark rückläufigen Volumina der Erhaltungsbaggerungen in den Seichtstellen der Wachau in den letzten Jahren. Wurden von 2011 bis 2015 in Summe noch zirka 473.000 m<sup>3</sup> (94.600 m<sup>3</sup>/a) im Zuge der Wasserstraßenerhaltung gebaggert, so waren es in den Jahren 2016 bis 2020 in Summe nur noch 25.000 m<sup>3</sup> (5.000 m<sup>3</sup>/a) (viadonau, 2021a). Wobei von 2018 bis 2020 nur zwischen Strom-km 2013,8 und 2013,6 (Seichtstelle Weißenkirchen) gebaggert wurde, und

hier in Summe nur rund 4.200 m<sup>3</sup>. Das Sediment aus diesen Baggerungen wurde dabei ausschließlich für den Bau von Kies- und Uferstrukturen verwendet. Der starke Rückgang an gebaggertem Sediment im Zuge der Erhaltung deutet auf eine Reduktion des ausgetragenen Sediments bzw. des Geschiebetransportes hin. Nicht erfasst sind in dieser Betrachtung unter Umständen Korngrößen, welche leichter über Seichtstellen hinweg transportiert werden, daher keine merklichen Anlandungen hervorrufen und so auch nicht gebaggert werden müssen.

Im Vergleich zur Strecke Östlich von Wien finden sich in der Wachau infolge der Durchbruchcharakteristik, auch Steine in Blockgröße (>200 mm) sowie große Blöcke (>630 mm) in der Sohle, welche ein Risiko für die Schifffahrt darstellen können. So fand z.B. im Mai 2021 im Bereich der Seichtstelle Schwallenbach (Strom-km 2022,7 bis 2022,0) die Bergung großer Blöcke statt, da es trotz ausreichender Wassertiefen, mehrfach zu Havarien kam (viadonau, 2021b).

### 3.2.1.9 Kraftwerk Altenwörth

Der Stauraum des KW Altenwörth (Strom-km 1980,40 / 1979,83; Vollstau 1976) liegt stromab der freien Fließstrecke Wachau und weist daher erhebliche Anlandungen im Stauwurzelbereich auf. Das KW Altenwörth zeichnet sich durch die zweitgrößte Wehrhöhe und das zweitgrößte Stauraumvolumen der Kraftwerkskette an der österreichischen Donau aus (siehe auch Nachtnebel et al., 1998) und ist nach dem KW Aschach das erste Kraftwerk mit hohen Feinsedimentablagerungen. Im Stauraum hat sich auf den ersten 5 km stromauf der Wehranlage eine beträchtliche Schwebstoffmenge abgelagert, die bis Strom-km 1995 allmählich abnimmt. Der (ehemalige) Sedimentationsbereich bei Strom-km 2000 resultiert aus dem Geschiebetransport der Wachau in den Stauwurzelbereich des Kraftwerks. Diese Anlandungen wurden im Zuge der Kompensationsbaggerungen im Bereich Krems weitestgehend entfernt (Abbildung 65 – linke Grafik, Abbildung 66 und Abbildung 68).

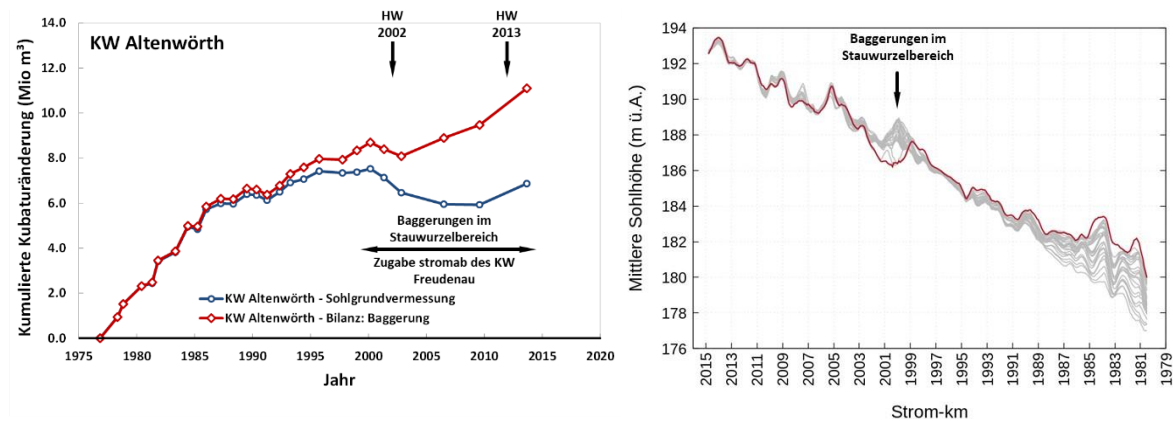


Abbildung 65. Links: Kumulierte Kubaturänderungen im Stauraum Altenwörth zwischen 1976 und 2013. Rechts: Entwicklung der mittleren Sohlhöhe im Stauraum Altenwörth zwischen 1976 und 2013. Die rote Linie zeigt die aktuelle Situation (Datengrundlage: Verbund).

Die Baggerungen erfolgen in etwa zwischen Strom-km 2003 und 1999,5, mit dem Ziel, die notwendige Brückendurchfahrtshöhe beim höchsten schiffbaren Wasserstand zu gewährleisten und die Hochwasserspiegellagen im Bereich der Stadt Krems zu senken (VHP, 2013a) (Abbildung 65 - rechte Grafik, Abbildung 66 und Abbildung 67). Das zwischen 1998 und 2016 gebaggerte Sedimentvolumen beträgt rund 3,8 Mio. m<sup>3</sup> (persönliche Mitteilung VHP, 2018) und wird für die stromab des KW Freudenau durchgeführten - Kieszugaben zur Sohlstabilisierung der freien Fließstrecke östlich von Wien verwendet.



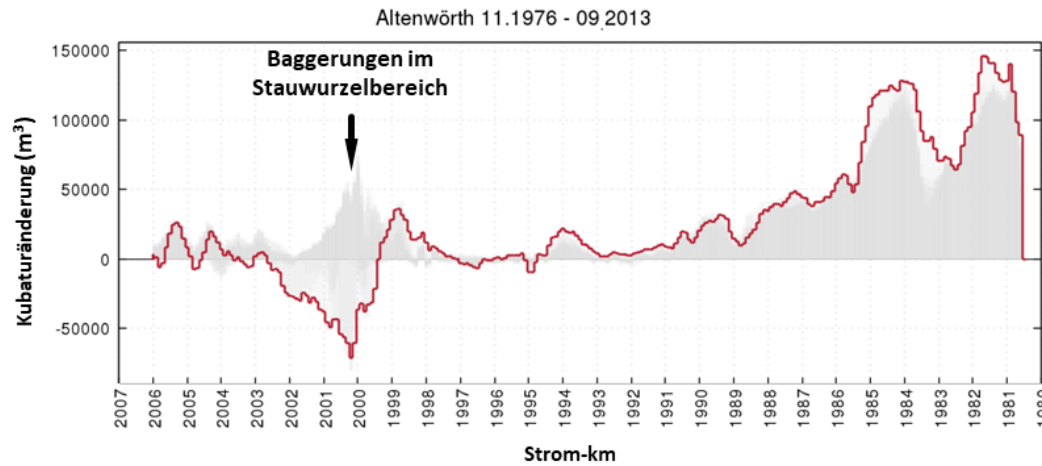


Abbildung 66. Stauraumentwicklung hinsichtlich Anlandung und Erosion (100 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge zwischen 1976 und 2013. Die graue Schattierung zeigt die Kubaturänderungen, die im Untersuchungszeitraum stattgefunden haben. Die rote Linie repräsentiert die Situation beim Vergleich der ersten mit der letzten verfügbaren Aufnahme (Datengrundlage: Verbund).

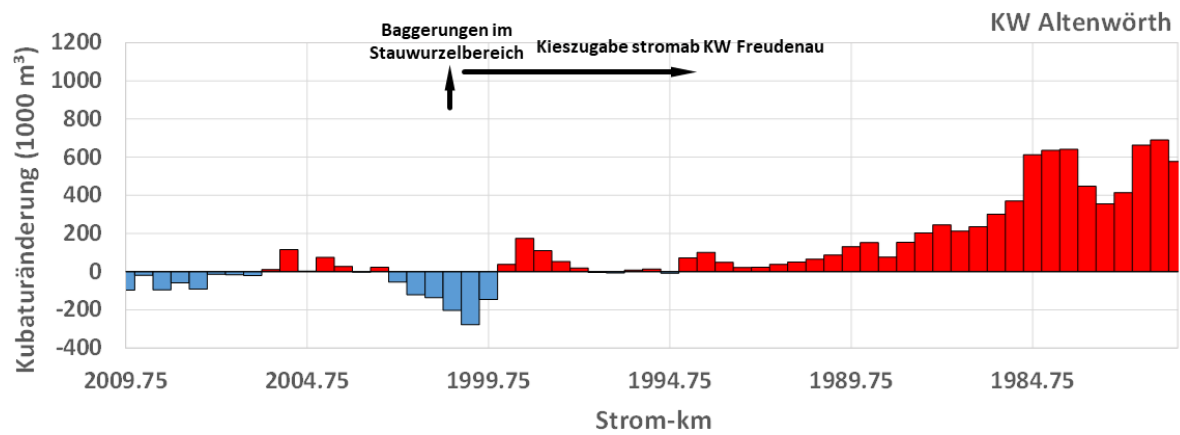


Abbildung 67. Kubaturänderungen (500 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1976 bis 2013 – Sohlgrundvermessung (Datengrundlage: Verbund).

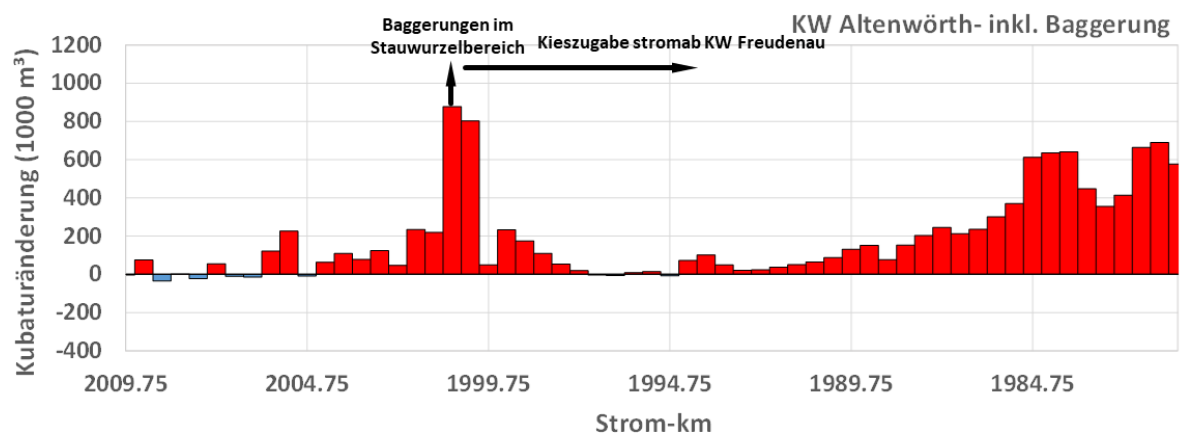


Abbildung 68. Kubaturänderungen (500 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1976 bis 2013 – Sohlgrundvermessung inkl. Baggerkubaturen (Datengrundlage: Verbund).

Summer und Nachtnebel (1989) erstellten eine Korngrößenverteilung im Längsverlauf des Stauraums, die zeigt, dass die Hauptanteil der abgelagerten Sedimente aus Sand und Schluff besteht (Abbildung 69). Lediglich im oberen Stauraumabschnitt (stromauf von Strom-km 1994) befinden sich

Kiesfraktionen. Abbildung 69 zeigt, dass - ausgehend vom Kraftwerk - die Korngrößen stromauf rasch zunehmen und dass die abgelagerten Sedimente einen hohen Sandanteil aufweisen. Nur auf den ersten 4 bis 5 km stromauf des Kraftwerks, wo die größten Ablagerungen stattfanden, beginnt der Schluffanteil zu dominieren (Abbildung 65- linke Grafik und Abbildung 66).

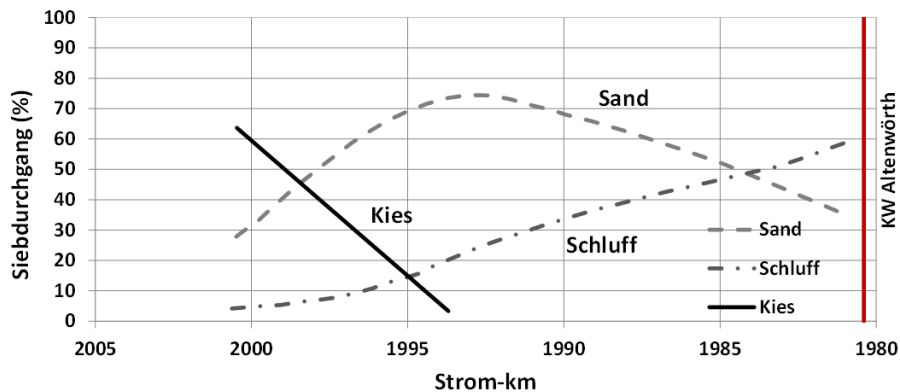


Abbildung 69. Korngrößenverteilung im Längsverlauf des Stauraums (nach Summer und Nachtnebel, 1989).

Vergleicht man die Korngrößen in Abbildung 69 mit jenen des KW Aschach in Abbildung 42, so wird eine gewisse Vergröberung der abgelagerten Sedimente in stromabwärtiger Richtung von Aschach nach Altenwörth deutlich. Die gleiche Beobachtung machten Kralik und Sager (1986), welche ebenfalls eine Vergröberung der abgelagerten Korngrößen von Aschach bis Greifenstein feststellten.

In den ersten zehn Jahren nach Inbetriebnahme des KW Altenwörth nahm das Volumen der abgelagerten Sedimente rasch zu (Abbildung 65). Danach nimmt die Sedimentationsrate ab und bleibt bis zur Jahrtausendwende nahezu unverändert. Die anschließende Reduktion an abgelagertem Material bis 2006 ist hauptsächlich auf die im Jahr 1998 begonnenen Baggerarbeiten im Bereich Krems zurückzuführen (Abbildung 65 – linke Grafik: blaue Linie) (siehe auch VHP, 2013a). Außerdem wurden stromab von Strom-km 1996 rund 0,5 Mio. m<sup>3</sup> während des Hochwassers 2002 remobilisiert. Das Hochwasser im Juni 2013 führte wiederum zu einer Nettoablagerung von ca. 1,3 Mio. m<sup>3</sup> im unteren Teil des Stauraums. Die letzte Sohlgrundvermessung vor dem Hochwasser wurde bereits 2009 durchgeführt, weshalb ein Teil der Sedimentation bereits vor dem Hochwasser im Jahr 2013 stattgefunden haben könnte. Inkludiert man bei der Berechnung der Ablagerungskubatur im Stauraum das durch Baggerungen entfernte Material (Abbildung 65 – linke Grafik: rote Linie), so lässt sich zwischen Ende 2002 und 2009 eine Nettoanlandungskubatur von ca. 1,4 Mio. m<sup>3</sup> feststellen. Diese resultiert zur Hälfte aus Feinsedimentablagerungen und zur Hälfte aus dem Geschiebeeintrag aus der Wachau. Seit der Inbetriebnahme des Kraftwerks beträgt die Netto-Feinsedimentablagerung stromab von Strom-km 1995 7,3 Mio. m<sup>3</sup>.

### 3.2.1.10 Kraftwerk Greifenstein

Der Stauraum Greifenstein (Strom-km 1949,23 / 1949,18; Vollstau 1984) ist nach Aschach und Altenwörth der drittgrößte an der österreichischen Donau. Die meisten Ablagerungen finden auf den ersten 2,5 km stromauf des Kraftwerks statt. Danach nehmen sie bis Strom-km 1956 ab (Abbildung 70).

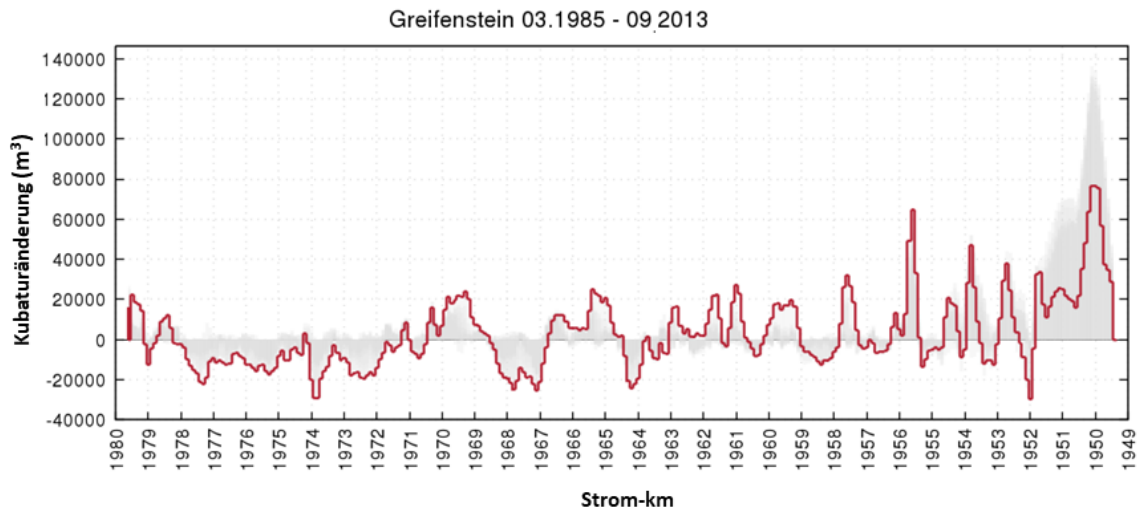


Abbildung 70. Stauraumentwicklung hinsichtlich Anlandung und Erosion (100 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1985 bis 2013. Die graue Schattierung zeigt die Kubaturänderungen, die im Untersuchungszeitraum stattgefunden haben. Die rote Linie repräsentiert die Situation beim Vergleich der ersten mit der letzten verfügbaren Aufnahme (Datengrundlage: Verbund).

Seit der Inbetriebnahme im Jahre 1984 bis zum Jahr 2002 weist der Stauraum eine nahezu konstante Sedimentationsrate auf, die nur durch das Hochwasser im Jahr 1991 unterbrochen wurde (Abbildung 71). Insgesamt lagerten sich über einen Zeitraum von 18 Jahren rund 3 Mio. m<sup>3</sup> Sedimente ab. Die Hochwasserereignisse im Jahr 2002, insbesondere jenes vom August 2002, führten - hauptsächlich auf den ersten 5 bis 6 km stromauf des Kraftwerks - zu einer Remobilisierung von fast 2 Mio. m<sup>3</sup>. Bis 2010 kam es stromab des Abschnitts, in dem 2002 die Remobilisierung stattfand wiederum zu einer Anlandung von ca. 700.000 m<sup>3</sup>. Während des Hochwassers im Jahr 2013 wurden lediglich 200.000 m<sup>3</sup> remobilisiert. Bis zum Jahr 2017 betrug die Anlandung im Stauraum rund 600.000 m<sup>3</sup>, wodurch sich seit der Inbetriebnahme des Kraftwerks eine Sedimentation von ca. 2,1 Mio. m<sup>3</sup> ergibt.

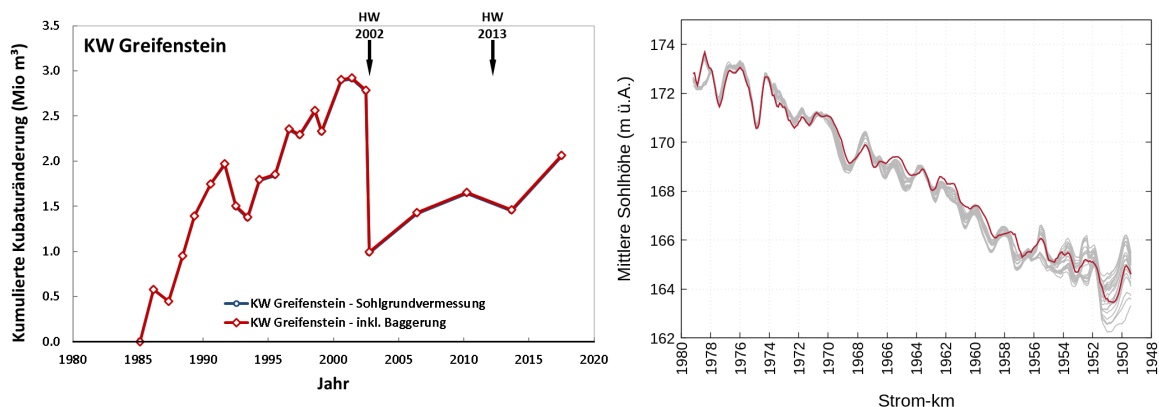


Abbildung 71. Links: Kumulierte Kubaturänderungen im Stauraum Greifenstein zwischen 1985 und 2017. Rechts: Entwicklung der mittleren Sohlhöhe im Stauraum Greifenstein zwischen 1985 und 2013. Die rote Linie zeigt die aktuelle Situation (Datengrundlage: Verbund).

### 3.2.1.11 Kraftwerk Freudenu

Das KW Freudenu (Strom-km 1921,05; Vollstau 1997) liegt in der Stadt Wien, wo die Donau seit der großen Donauregulierung in Wien (Strom-km 1935 bis 1918) in den Jahren 1870 bis 1875 begradigt ist. Das zweite große Regulierungsprojekt umfasste den, in den Jahren 1972 bis 1988 zur Verbesserung des Hochwasserschutzes durchgeführten Bau der Neuen Donau, sowie der Donauinsel. Das bedeutet, dass die Donau in Wien bei Hochwasser durch zwei getrennte Flussarme strömt.

Der Bau des KW Freudenau startete im Jahr 1992. Es ist das letzte Kraftwerk, das an der österreichischen Donau in Betrieb genommen wurde (Ende 1997). Daher wurde bis zum Teilstau im Jahr 1996 der Abschnitt östlich von Wien aus weiteren 28 km mit Geschiebe versorgt. Bis zum Beginn der Bauarbeiten war die Stromsohle Erosionsprozessen ausgesetzt. Laut BMNT (2018b) betrug der Geschiebetransport in der Strecke zwischen dem KW Greifenstein und Freudenau ca. 160.000 m<sup>3</sup>/a. Diese Menge wurde auch als Richtwert für die Kieszugabe stromab des KW Freudenau herangezogen.

Seit Inbetriebnahme des Kraftwerks sind die Kubatur- und Sohlhöhenänderungen eher gering (Abbildung 72). Grau hinterlegt in Abbildung 72 ist der Zeitraum von Baubeginn des KW Freudenau (1992) bis zum Teileinstau (1996), da sich die Bilanzierung auf Grund des Einflusses des Kraftwerkbaus (Profiländerungen und Baggerungen) schwierig gestaltet. Die Sedimentation konzentriert sich hauptsächlich auf die untere Hälfte des Stauraums, während die Erosion im oberen Abschnitt überwiegt (Abbildung 73). Das Hochwasser im Juni 2013 verursachte eine Anlandung von ca. 330.000 m<sup>3</sup> in der unteren Hälfte des Stauraums, während zwischen Strom-km 1942 und 1936 ein Volumen von 80.000 m<sup>3</sup> erodierte (VHP, 2014). Seit dem Teilaufstau im Jahr 1996 ist ein Nettoaustrag von ca. 260.000 m<sup>3</sup> aufgetreten. Zieht man allerdings das Datum der Inbetriebnahme (Ende 1997) zur Berechnung heran, so lässt sich ein Anlandungsvolumen von ca. 170.000 m<sup>3</sup> feststellen (Abbildung 72).

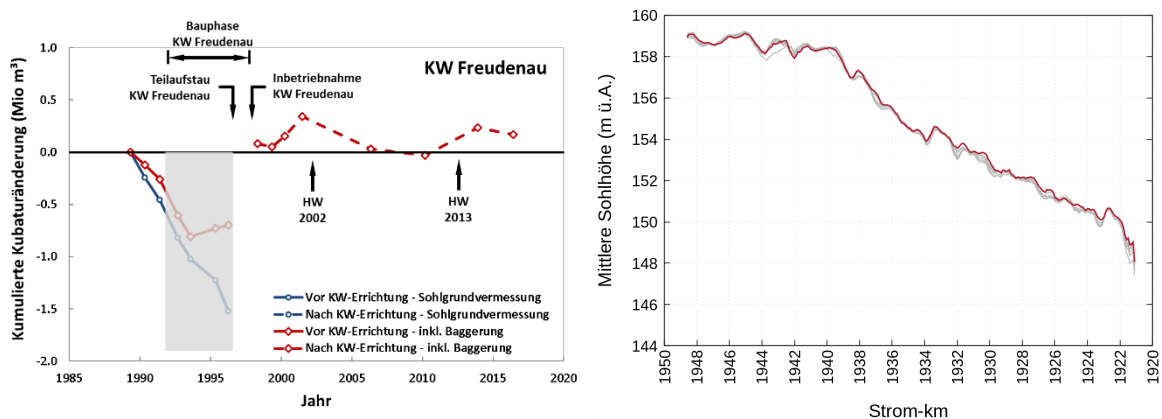


Abbildung 72. Links: Kumulierte Kubaturänderungen im Stauraum vor und nach KW-Errichtung Ende 1997. Rechts: Entwicklung der mittleren Sohlhöhe im Stauraum Freudenau zwischen 1998 und 2016. Die rote Linie zeigt die aktuelle Situation (Datengrundlage: Verbund).

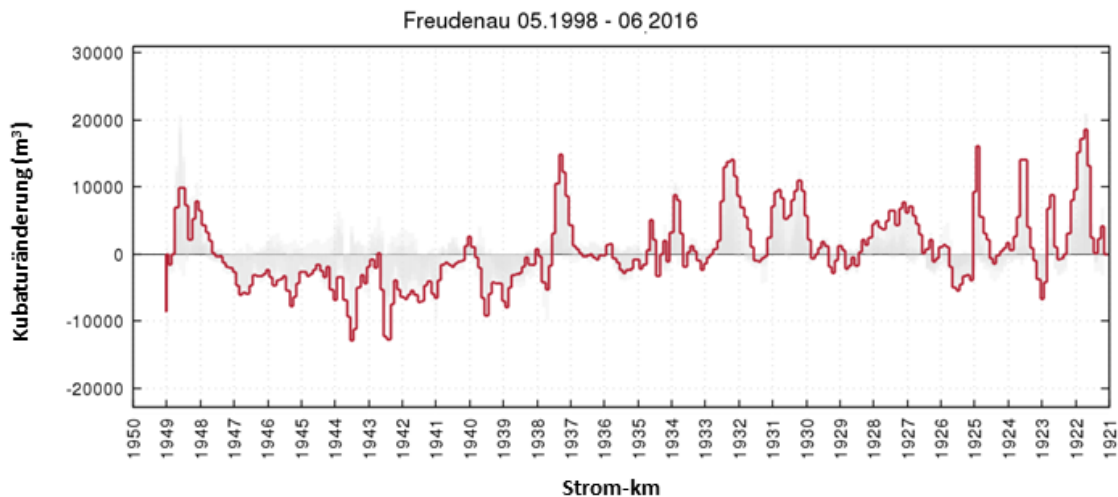


Abbildung 73. Stauraumentwicklung hinsichtlich Anlandung und Erosion (100 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1998 bis 2016 (nach Inbetriebnahme des Kraftwerks). Die graue Schattierung zeigt die Kubaturänderungen, die im Untersuchungszeitraum stattgefunden haben. Die rote Linie repräsentiert die Situation beim Vergleich der ersten mit der letzten verfügbaren Aufnahme (Datengrundlage: Verbund).

### 3.2.1.12 Östlich von Wien

Der Flussabschnitt östlich von Wien ist einer der beiden verbleibenden freien Fließstrecken an der österreichischen Donau, der sich im Nationalpark Donau-Auen beziehungsweise im Marchfeld befindet. Im oberen Abschnitt befindet sich das KW Freudenau. Stromab dieses Kraftwerks finden - im Unterschied zur Wachau - Geschiebezugaben statt. Der stromab befindliche Abschnitt wird durch den Rückstau des KW Gabčíkovo (Inbetriebnahme 1992) beeinflusst, welcher - in Abhängigkeit des Durchflusses - zirka bis zur Marchmündung bei Strom-km 1880,10 reicht. Im Hinblick auf das Sedimentmanagement hat diese freie Fließstrecke in den letzten 30 Jahren mehrere Phasen durchlaufen.

Ein wichtiger Bestandteil dieser Sedimentbewirtschaftung ist die Geschiebezugabe stromab des KW Freudenau durch den Kraftwerksbetreiber Verbund. Diese Maßnahme begann 1996 und umfasste die Verklappung von ca. 186.000 m<sup>3</sup>/a Kies in der Erhaltungsstrecke (Strom-km 1921 – 1910) in den Jahren 1996 bis 2017. Diese Menge wurde kürzlich auf 235.000 m<sup>3</sup>/a erhöht (BMNT, 2018b), und von 2018 bis 2020 wurden im Mittel 244.000 m<sup>3</sup>/a zugegeben (DonauConsult, 2021).

Darüber hinaus werden im Rahmen des Maßnahmenkatalogs für die Donau östlich von Wien mehrere Aktivitäten mit den übergeordneten und gleichwertigen Entwicklungszielen, welche die Stabilisierung der Wasserspiegel des Oberflächen- und Grundwassers, die Erhaltung und Verbesserung der Lebensräume in den Donauauen und die Verbesserung der Wasserstraßeninfrastruktur für die Binnenschifffahrt verfolgen. Diese Maßnahmen bestehen aus einem integrativen Sedimentmanagement, der Optimierung von Regulierungsbauwerken, der Wiederanbindung von Nebenarmen, Uferrückbau und dem Schutz von kritischen Kolken. All diese Maßnahmen dienen dazu, die Sedimente länger im System zu halten, die Transportkapazität im Hauptstrom zu reduzieren, einen etwaigen Sohldurchschlag zu verhindern und die ökologische Situation zu verbessern (viadonau, 2018).

Im Rahmen der Fahrrinnenerhaltung wurden zwischen 1996 und 2005 ca. 50% im Hauptstrom wiederverklappt, 30% entnommen und 20% für den Bau von Kiesstrukturen verwendet (Simoner, 2018). Ab 2006 wurde das gesamte Baggergut zunächst stromab und ab 2009 stromauf der

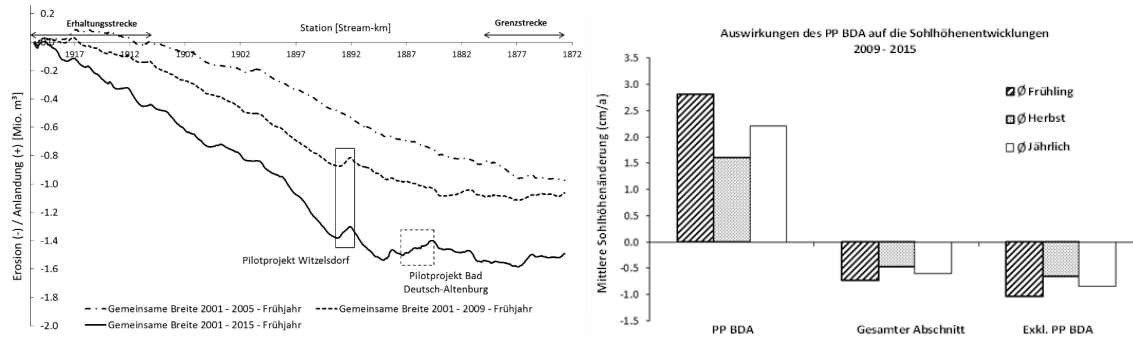
Baggerstelle wieder im Hauptstrom verklappt. Schließlich wurden ab 2015 die Verfuhrweiten zu Berg auf rund 11 km erhöht, um dadurch die Sedimente länger im System zu halten (Simoner, 2018). Zusätzlich wurde im Jahr 2017 bei Strom-km 1888 ein Geschiebefang eingerichtet, von dem aus die gebaggerten Sedimente etwa 18 bis 20 km stromaufwärts transportiert werden. Weiters wird ab 2021 ein zweiter Geschiebefang zwischen Strom-km 1885,0 und 1884,2 (Bereich Hainburg) eingerichtet und bewirtschaftet werden.

Hinsichtlich der Umgestaltung der Regulierungsbauwerke bzw. im Zuge von Renaturierungsmaßnahmen wurden in den letzten 20 Jahren mehrere Pilotprojekte von der viadonau umgesetzt. Besonders hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang:

- Der Uferrückbau Thurnhaufen im Jahr 2006, bei dem auf einer Länge von 2,85 km die Uferverbauung entfernt wurde und somit die Ufererosion wieder zugelassen wird.
- Die Umgestaltung und Optimierung der Bühnen (andere Form, größere Abstände und geringere Höhe) bei Witzelsdorf (Strom-km 1892,5) in Verbindung mit der Höhenreduktion des stromaufwärts befindlichen Leitwerks und der Entfernung der Uferverbauung (2015 abgeschlossen).
- Die Umgestaltung und Optimierung der Bühnen (andere Form, größerer Abstand und geringere Höhe) bei Bad Deutsch-Altenburg (Strom-km 1887,5 - 1884,5) in Kombination mit der Entfernung der Uferverbauung (abgeschlossen 2017). Der Test der so genannten granulometrischen Sohlverbesserung fand im selben Projekt statt. Dabei wurden größere Steine (aber immer noch innerhalb des natürlichen Korngrößenspektrums) auf die Stromsohle aufgebracht, mit dem Ziel die Geschiebetransportkapazität zu reduzieren.
- Die Wiederanbindung mehrerer Nebenarme wie z.B. Haslau-Regelsbrunn, Orth, Schönau, Jöhler-Arm und des Spittelauer Armes.

In Pessenlehner et al. (2016) wurde der Einfluss der beiden Pilotprojekte, bei denen die Bühnen optimiert wurden bewertet, um den Einfluss der Maßnahmen auf die Sedimentbilanz östlich von Wien zu ermitteln. Dabei sind im Abschnitt des Pilotprojekts Bad Deutsch-Altenburg (nach 2009 umgesetzt) für den Zeitraum 2001 bis 2015 Anlandungen zu beobachten. Genauso ist auch in dem weiter stromaufwärts gelegenen Abschnitt bei Witzelsdorf ein höheres Sohlniveau feststellbar (Abbildung 74 – linke Grafik). Ebenfalls sichtbar in Abbildung 74 ist der Rückstaubereich des KW Gabčíkovo, in dem stromab von Strom-km 1880 das Sohlniveau stabil zu sein scheint. Dargestellt sind dabei jeweils die Sohlspeicheränderungen basierend auf den Sohlgrundaufnahmen, d.h. ohne Berücksichtigung der Zugabe der VHP und des Geschiebemanagements der viadonau. Für den Zeitraum 2009 bis 2015 berechneten Pessenlehner et al. (2016) eine jährliche mittlere Sohlhöhenänderung für den Abschnitt des Pilotprojekts Bad Deutsch-Altenburg von +2,2 cm/a. Im Vergleich dazu wurde für den gesamten Abschnitt östlich von Wien eine Erosionsrate von -0,6 cm/a ermittelt. (Abbildung 74 - rechte Grafik). Die Umsetzung der Pilotprojekte Witzelsdorf und Bad Deutsch-Altenburg bewirkte dabei eine Reduktion der Eintiefung um rund 30 % im Zeitraum 2009 bis 2015 (Habersack et al., 2017). Die Ergebnisse dieser Untersuchungen verdeutlichten, dass die Renaturierungsmaßnahmen zu einer Verringerung der laufenden Sohleintiefung beitragen können. Laut Habersack et al. (2017) konnte durch den Aufweitungseffekt und der somit erzielten Reduktion der Transportkapazität nicht nur im unmittelbaren Bereich der Umsetzung, sondern auch darüber hinaus eine Verlangsamung der Sohleintiefung erreicht werden. Außerdem zeigte sich, dass eine Optimierung der Maßnahmen unerlässlich ist, um einerseits geringere Erosionsraten zu erzielen und

andererseits die erforderlichen Schifffahrtsbedingungen einzuhalten. Ebenfalls einen positiven Effekt auf die Reduktion der Eintiefung hat das Beenden der Entnahme von Geschiebe im Zuge der Erhaltungsbaggerungen und die Verfuhr zu Berg. Im Vergleich zu den Bühnenumbauten, welche die Transportkapazität senken, wird durch die Verfuhr zu Berg die Sedimentverfügbarkeit erhöht.



**Abbildung 74. Links: Kumulierte Kubaturänderungen zwischen dem KW Freudenu und der slowakischen Grenze (Strom-km 1920,6 – 1872,7) für die Perioden 2001 – 2005, 2001 – 2009 and 2001 – 2015 (Habersack et al., 2017). Rechts: Auswirkungen des Pilotprojekts Bad Deutsch-Altenburg auf die mittlere jährliche Sohlhöhenänderung für den Zeitraum 2009 – 2015 (Pessenlehner et al., 2016).**

Bezüglich der Sohlhöhenentwicklung und der Erosionsvolumina in der jüngeren Vergangenheit, finden sich in der Literatur mehrere Werte. Die Berechnungen wurden für verschiedene Zeiträume und unterschiedliche Längen durchgeführt. Klasz et al. (2016) ermittelte für den Abschnitt zwischen Strom-km 1916 und 1893 eine jährliche Erosionsrate von -2 cm/a für den Zeitraum 1996 bis 2015. Außerdem gibt er auch ein Erosionsvolumen von 151.000 m³/a für den Zeitraum 1996 bis 2011 zwischen Strom-km 1921 und 1880 an. In Simoner und Berger (2016) finden sich für den Abschnitt zwischen Strom-km 1920 und 1880 Werte für das Erosionsvolumen für den Zeitraum 1996 bis 2016 mit 124.000 m³/a, für 1996 bis 2006 mit 165.000 m³/a und für 2006 bis 2016 mit 92.000 m³/a. Sie berechneten auch die Kubaturänderungen für den kürzeren Zeitraum zwischen 2009 und 2016, mit einem Erosionsvolumen von 73.000 m³/a. Bei Betrachtung der Strecke stromab der VHP-Erhaltung zwischen Strom-km 1910 und 1880 errechneten Simoner und Berger (2016) ein Geschiebedefizit von 126.000 m³/a für die Jahre 1996 bis 2006, sowie 53.000 m³/a für den Zeitraum 2006 bis 2016. Auch hier zeigt sich die Verbesserung der Situation hinsichtlich des Geschiebedefizits auf Grund des geänderte Geschiebemanagement der viadonau, sowie der umgesetzten Pilotprojekte Witzelsdorf und Bad Deutsch-Altenburg. Darüber hinaus wurde auf Grundlage der mittleren Wasserstände zwischen den Jahren 1996 und 2015 eine Erosionsrate von -1 cm/a angegeben. BMNT (2018b) errechnete eine Eintiefungsrate von etwa -1,5 cm/a für den Zeitraum 1996 bis 2010, basierend auf Veränderungen des Regulierungsniederwassers. Eine Erosionsrate von -1 cm/a für den Zeitraum von 2001 bis 2015 und -1,16 cm/a für den Zeitraum von 2001 bis 2009, sowie -0,6 cm/a für die Jahre von 2009 bis 2015 für die Gesamtstrecke Östlich von Wien findet sich bei Habersack et al. (2017).

Allen genannten Quellen ist gemein, dass beim Vergleich der letzten zirka 20 Jahre mit den letzten 10 Jahren die Erosionsraten bzw. die erodierten Mengen abnehmen. Dieser Trend wird auch sichtbar, wenn man die Entwicklung der Kubaturänderungen zwischen 1990 und 2017 (Abbildung 75- linke Grafik, blaue Linie) und die Entwicklung der mittleren Sohlhöhe in Abbildung 76 betrachtet. Das Längsprofil in Abbildung 75 (rechte Grafik) zeigt einen Erosionstrend überwiegend stromauf von Strom-km 1893 bzw. 1889 und eine stabilere bzw. sich leicht hebende Stromsohle im stromabwärts gelegenen Abschnitt.

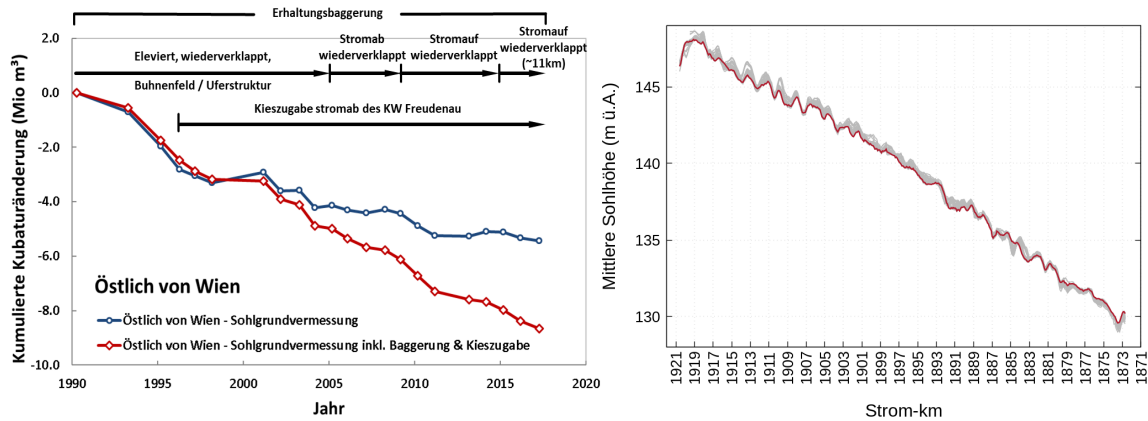


Abbildung 75. Kumulierte Kubaturänderungen in der freien Fließstrecke östlich von Wien für den Zeitraum 1990 bis 2017. Rechts: Mittlere Sohlhöhenentwicklung östlich von Wien für den Zeitraum 1990 bis 2017. Die rote Linie zeigt die aktuelle Situation (Datengrundlage: viadonau).

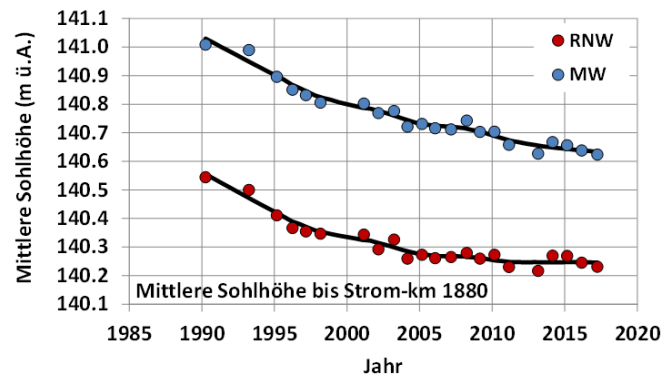


Abbildung 76. Sohlhöhenentwicklung östlich von Wien zwischen Strom-km 1920 – 1880 (ohne Grenzstrecke) bis 2017. Rote Punkte: Mittlere Sohlhöhe unterhalb RNW-Anschlaglinie; blaue Punkte: Mittlere Sohlhöhe unterhalb MW-Anschlaglinie. Die schwarze Linie zeigt den Gesamttrend nach Glättung.

Eine wesentliche Auswirkung hat in diesem Zusammenhang die Kieszugabe stromab des KW Freudenaus. Zum Beispiel verringert sich für den Zeitraum 1996 bis 2010 durch die Zugabe von  $193.000 \text{ m}^3/\text{a}$  die Erosionsrate auf einer Länge von 40 km (mittleren Sohlbreite von 250 m) zwischen dem Kraftwerk und der Marchmündung um zirka  $1,9 \text{ cm/a}$  (BMNT 2018b). Bei einer Eintiefungsrate von  $-1,5 \text{ cm/a}$  (1996 bis 2010, basierend auf Änderung der RNW Wasserspiegel), reduziert sich die Eintiefung infolge Zugabe von rund  $-3,4 \text{ cm/a}$ , um  $1,9 \text{ cm/a}$ , auf  $-1,5 \text{ cm/a}$ . Für den jüngeren Zeitraum zwischen 2009 und 2017 reduziert sich durch die Zugabe von  $175.000 \text{ m}^3/\text{a}$  (2009 bis 2017) die Erosionsrate um zirka  $1,8 \text{ cm/a}$  auf einer Länge von ca. 40 km.

Die Auswirkungen der Erhaltungsbaggerungen auf die Erosionsrate wurde vom BMNT (2018b) mit etwa  $0,4 \text{ cm/a}$  für die Zeit zwischen 1996 und 2010 (wiederum über eine Länge von 40 km) angegeben. Das bedeutet, dass etwa 20% der Sohleintiefung dadurch verursacht wurden, weil die Sedimente dem Fluss entnommen wurden. Der aus Erhaltungsbaggerungen gewonnene Kies wird heute vollständig wieder verklappt. Um zu sehen, wie es sich in Bezug auf die Erosionsrate verhält, wenn dies nicht die Praxis wäre (d.h. der Kies würde zur Gänze entfernt), wurde für den Zeitraum 2009 bis 2017 als hypothetisches Beispiel angenommen, dass der Kies entnommen wird. In diesem Fall wären die Erosionsraten wesentlich höher (eine zusätzliche Erosionsrate von  $1,9 \text{ cm/a}$  auf einer Länge von 40 km). Dies bedeutet, dass die Wiederverklappung der Sedimente im Fluss einen messbaren und positiven Effekt auf die Verringerung der Eintiefungstendenzen hat.



Zieht man bei den Kubaturberechnungen neben der Sohlgrundvermessung auch die Baggerungen und Zugaben hinzu, so ergibt sich für die Zeit nach 2001 eine aus dem Abschnitt abtransportierte Kiesmenge von 290.000 bis 330.000 m<sup>3</sup>/a (exklusive Abrieb). Der gemessene Transport bei Strom-km 1886,24 für den Zeitraum 2009 bis 2018 liegt bei ca. 380.000 t/a oder ca. 220.000 m<sup>3</sup>/a (siehe auch Gmeiner et al., 2016 und Liedermann et al., 2018). BMNT (2018a) errechnete eine Nettokubaturänderung (einschließlich Abrieb) von 340.000 m<sup>3</sup>/a (+/- 20.000 m<sup>3</sup>/a) für die Zeit bis zum Jahr 2010.

### 3.2.2 Baggerungen und Verklappungen

Die Menge an Kies und Sand, die durch Baggerungen aus einem Fluss entnommen wird, spielt eine entscheidende Rolle bei der Erstellung einer Sedimentbilanz. Sie trägt dazu bei, den Beitrag der Baggerarbeiten zur Erosion der Stromsohle und die potenziellen Auswirkungen in den flussaufwärts und flussabwärts gelegenen Abschnitten zu bestimmen (z.B. rückschreitende Erosion oder reduzierter Transport bestimmter oder aller Korngrößen flussabwärts). Die Sedimentbilanzierung kann auch bei der Planung von Bagger- und Zugabestrategien (z.B. Verklappung von gebaggertem Material flussaufwärts) helfen und dazu beitragen, ihre positiven Auswirkungen bei der Schaffung eines dynamischen und ausgewogenen Sedimentregimes zu beobachten.

Die Standorte und Mengen der in Österreich durchgeführten Baggerungen veränderten sich im Laufe der Jahre vor allem durch Arbeiten im Rahmen der Nieder- und Mittelwasserregulierung, sowie durch den Bau von zehn Kraftwerken zwischen 1955 und 1997. In den Jahren der Nieder- und Mittelwasserregulierung wurden erhebliche Mengen für flussbauliche Maßnahmen und zum Zwecke der Erhaltung, aber auch z.B. für den Kraftwerks- und Straßenbau gebaggert (Schmutterer, 1952; Tschochner, 1957; Geitner, 1969; Geitner, 1978). Die Abbildung 77 zeigt die unterschiedlichen Mengen an Baggerkies, hinsichtlich der Nutzung für die Zeit zwischen 1936 und 2016. Insgesamt betrachtet, wurde nicht das gesamte in Abbildung 77 mit roten Balken dargestellte Baggergut entnommen. Ein (unbekannter) Teil davon wurde im Hauptstrom der Donau wieder verklappt und ein Teil wurde für die Errichtung von Regulierungsbauwerken verwendet. Die Wiederverklappung in Abbildung 77 bezieht sich dabei auf die Zugabe im Hauptstrom von Sediment aus Seichtstellenbaggerungen im Zuge der Wasserstraßenerhaltung der viadonau. Baggerung für Kieszugabe stellen die Baggerungen der VHP im Bereich Stein-Krems (Stauwurzel KW Altenwörth) dar, und somit jenes Sediment welches in der Erhaltungsstrecke stromab des KW Freudenau wieder zugegeben wird.

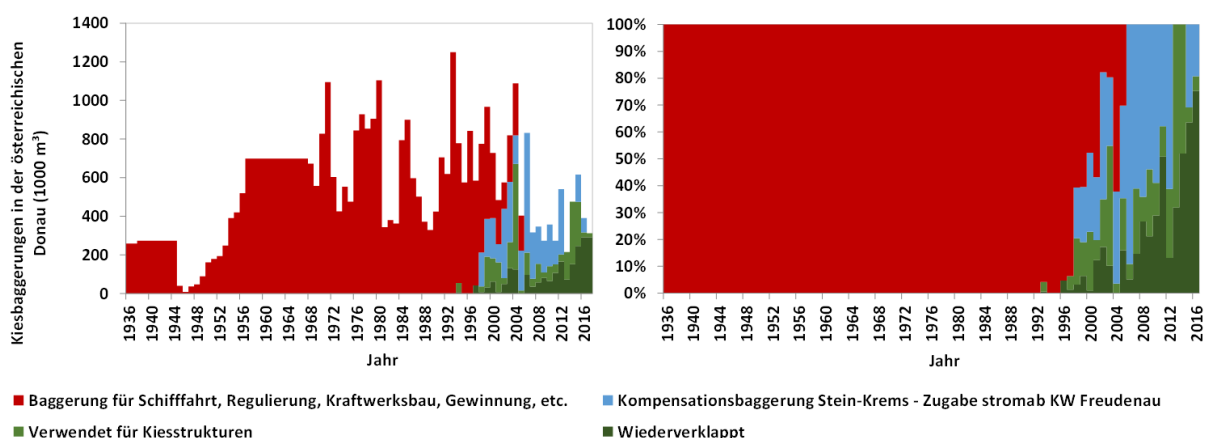


Abbildung 77. Kiesbaggerungen in der österreichischen Donau hinsichtlich deren Verwendung im Zeitraum 1936 bis 2016 (links in m<sup>3</sup> und rechts in %).

Seit Mitte der 1990er Jahre fand ein Paradigmenwechsel statt und es ist ein allmählicher Rückgang der gebaggerten (entfernten) Kiesmenge zu beobachten. Anstatt den aus Erhaltungsbaggerungen gewonnenen Kies dem Strom gänzlich zu entziehen, wurde er entweder für den Bau von Kiesbänken und -inseln verwendet (z.B. seit Beginn des 21. Jahrhunderts in der Wachau - siehe auch Zauner et al., 2016) oder im Hauptstrom (hauptsächlich Östlich von Wien) wieder verklappt (Abbildung 77 und Abbildung 78 - grüne Balken). Insbesondere die Wiederverwendung des zur Aufrechterhaltung der Fahrwassertiefen in der Schifffahrtsrinne entnommenen Baggermaterials in der freien Fließstrecke östlich von Wien, hat sich in den letzten 20 Jahren mehrmals geändert. Nach Simoner (2018) wurden zwischen 1996 und 2005 ca. 50% wieder dem Hauptstrom zugeführt, 30% entnommen und 20% für den Bau von Kiesstrukturen verwendet. Ab 2006 wurde das gesamte Baggergut zunächst stromab und ab 2009 stromauf der Baggerstelle wieder im Hauptstrom verklappt. Ab 2015 wurde schließlich die stromaufwärts gerichtete Transferstrecke deutlich auf rund 11 km erhöht (Simoner, 2018). Darüber hinaus ist seit 2017 im Zuge des Geschiebemanagements Östlich von Wien auch ein Geschiebefang zwischen Strom-km 1888,4 und 1887,7 (Treuschütt) in Betrieb. Die hier gebaggerten Sedimente werden rund 18 bis 20 km stromauf verführt und wiederverklappt. Ab 2021 wird ein zweiter Geschiebefang im Bereich Hainburg zwischen Strom-km 1885,0 und 1884,2 eingerichtet und bewirtschaftet werden.

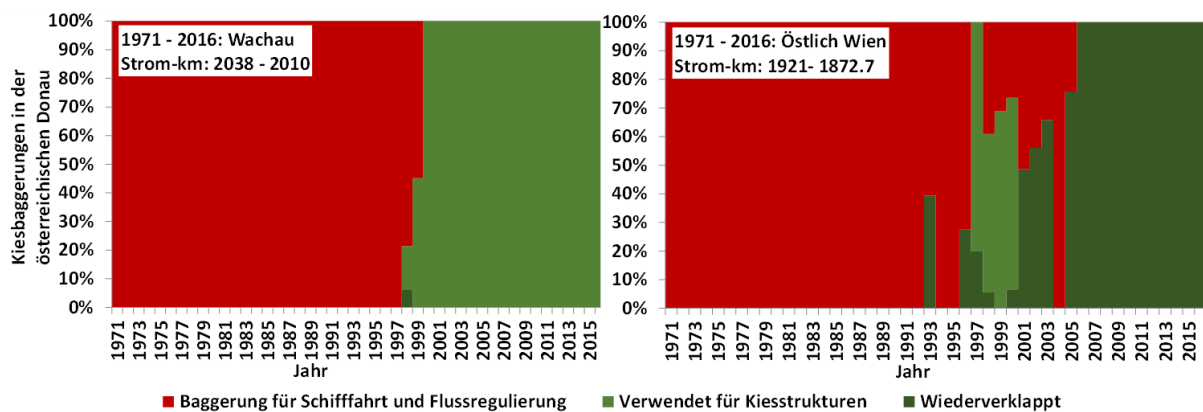


Abbildung 78. Menge an gebaggerten Kies (in %) in den beiden freien Fließstrecken Wachau und östlich Wien, hinsichtlich dessen Verwendung. Zeitraum zwischen 1971 und 2016 (Quelle: Donaukommission, Mühlbauer (2017), Schmutz et al. (2000), viadonau).

Auch der aus der freifließenden Strecke Wachau in den Stauwurzelbereich des Kraftwerks Altenwörth transportierte Kies wird nicht entnommen, sondern stromab des Kraftwerks Freudenau als Material für die Kieszugabe verwendet (Abbildung 77 und Abbildung 80 - blaue Balken). Die Baggerung erfolgt in etwa zwischen Strom-km 2003 und 1999,5 mit dem Ziel, die notwendige Durchfahrtshöhe bei Brücken beim höchsten schiffbaren Wasserstand zu gewährleisten und die Hochwasserspiegellagen bei der Stadt Krems zu senken (VHP, 2013a). Die Kieszugaben stromab des Kraftwerks Freudenau in der Erhaltungsstrecke (Strom-km 1921 bis 1910) betrug in den Jahren 1996 bis 2017 ca. 186.000 m<sup>3</sup>/a (Abbildung 79). Diese Menge wurde kürzlich auf 235.000 m<sup>3</sup>/a erhöht (BMNT, 2018b), und von 2018 bis 2020 wurden im Mittel 244.000 m<sup>3</sup>/a zugegeben (DonauConsult, 2021).

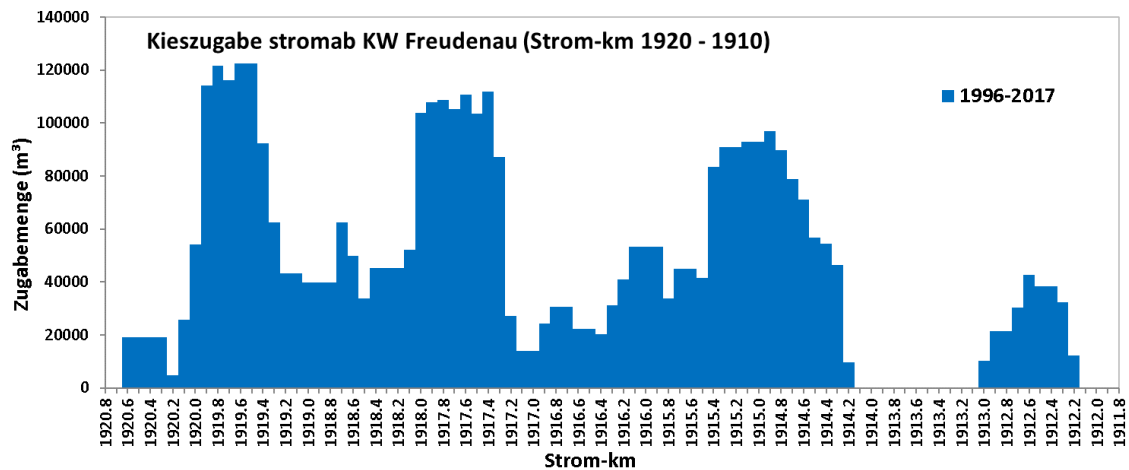


Abbildung 79. Kieszugabe stromab des KW Freudenau im Zeitraum 1996 – 2017 (Datengrundlage: Verbund).

Abbildung 80 gibt einen Überblick über die Menge (in m<sup>3</sup>) und den Standort (Strom-km) der Baggerarbeiten im Zeitraum 1971 bis 2016. Neben den bereits erwähnten Erhaltungsbaggerungen in den beiden freien Fließstrecken und der Baggerung in der Stauwurzel des Kraftwerks Altenwörth, gibt es zwei Bereiche mit einem hohen Baggeraufkommen. Der eine befindet sich in der Nähe der Stadt Linz im Stauraum Abwinden-Asten, wo zwischen Strom-km 2134 und 2128 ca. 2,5 Mio. m<sup>3</sup> für den Hochwasserschutz gebaggert wurden (siehe auch VHP, 2014).

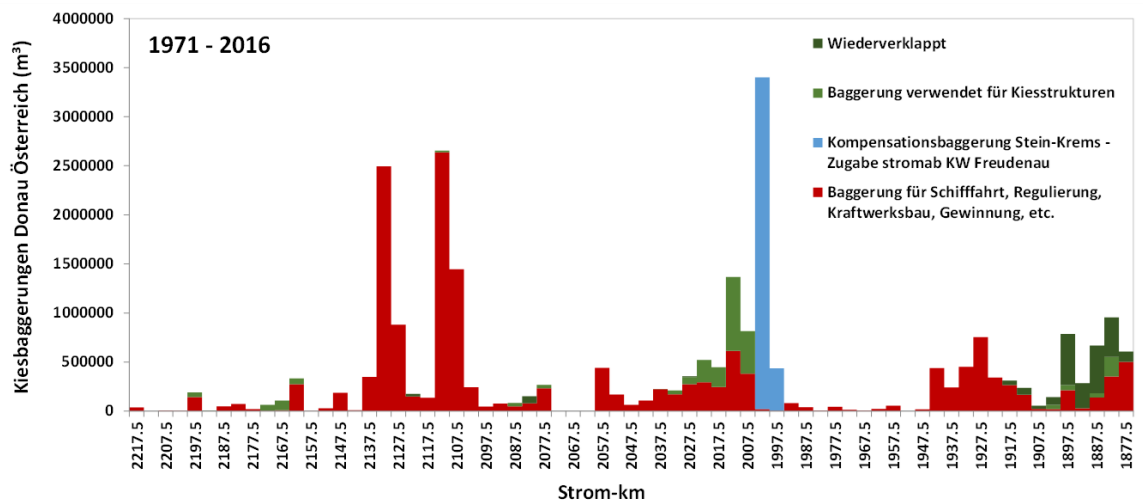


Abbildung 80. Gebaggerte Kiesmenge in 5 km Abschnitten zwischen 1971 und 2016 (Quellen: Donaukommission, Mühlbauer (2017), Schmautz et al. (2000), Verbund, viadonau).

Der andere maßgebliche Baggerbereich befindet sich im Stauraum Wallsee-Mitterkirchen. Hier wurden zwischen Strom-km 2119,5 - 2112 in den Jahren 1977 bis 1980, im Zuge der Unterwassereintiefung während der Errichtung des stromauf befindlichen Kraftwerks Abwinden-Asten, in Summe rund 1,9 Mio. m<sup>3</sup> gebaggert. Unter Unterwassereintiefung versteht man die aktive Absenkung der Flusssohle stromab eines Kraftwerks zur Erhöhung der hydraulischen Fallhöhe (siehe auch Prazan, 1990). Dies war eine übliche Maßnahme für die an der österreichischen Donau errichteten Kraftwerke. Der Rest der Baggerarbeiten im Stauraum Wallsee-Mitterkirchen diente hauptsächlich kommerziellen Zwecken und wurde zwischen Strom-km 2110 - 2104 durchgeführt (siehe auch Schmautz et al., 2000 und VHP, 2014).

### 3.2.3 Vorlandverlandung

Als Folge von Ausuferungen während großen Hochwasserereignissen kommt es in den Überflutungsflächen aufgrund der verringerten Fließgeschwindigkeiten zu Sedimentation des Feinmaterials. So kam es während der Hochwasserereignisse 2002 und 2013 in zahlreichen Donau-Gemeinden zu Ablagerungen von Sedimenten und Treibgut. 2013 war der überwiegende Teil der betroffenen Flächen landwirtschaftlich genutzt, es lagerte sich aber auch Sediment auf Verkehrsflächen und in Siedlungsgebieten ab (Abbildung 81) (Habersack et al. 2015).

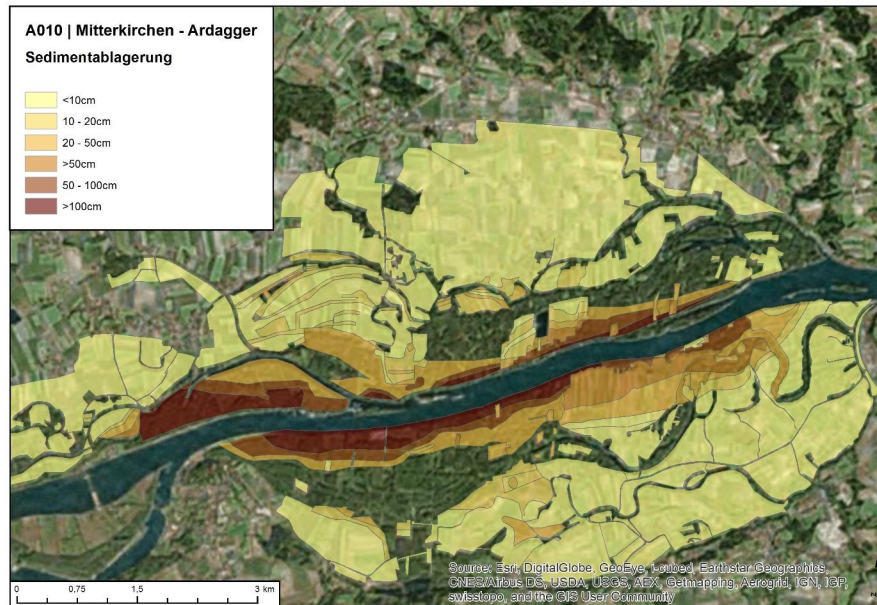


Abbildung 81. Ablagerungsbereiche und -höhen im Bereich Mitterkirchen–Ardagger (Habersack et al., 2015; Datenbasis: LW-Kammer OÖ).

Unmittelbar nach den Hochwasserereignissen im August 2002 und Juni 2013 wurden in großen Bereichen der Vorländer die Sedimentanlandung erhoben und aufgezeichnet (BMLFUW, 2015). Aus einem Vergleich mit anderen Daten (BMLFUW, 2015) ist zu vermuten, dass die Anlandungsmengen im Machland überschätzt wurden. Für einzelne Bereiche der Donau, wie dem Tullnerfeld Nord und dem Bereich unterhalb des KW Freudenaus, sind keine Aufzeichnungen vorhanden. Für diese Abschnitte wurden die Anlandungsmengen geschätzt (BMLFUW, 2015). Die vor Ort ermittelten Sedimentablagerungen stimmen mit jenen aus dem im Herbst/Winter 2013 durchgeführten Laserscanaufnahmen von Oberösterreich nicht gut überein und es ergeben sich oft und auch in Summe deutlich größere Ablagerungen durch die vor Ort aufgenommenen Daten (BMLFUW, 2015). Als Ursachen sind neben den Unschärfen der beiden Messmethoden auch die unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkte und der damit verbundenen Konsolidierung bzw. teilweisen erfolgten Entfernung der Feinsediment zu nennen (BMLFUW, 2015). Darüber hinaus erfolgten die Aufnahmen vor Ort nur an land- und forstwirtschaftlichen Grundstücken, einzelne Flächen mit anderer Nutzung wurden trotz deutlicher Anlandung nicht erfasst.

Im Eferdinger Becken zwischen Strom-km 2158 und 2145 kam es zu einer Anlandung von rund 0,31 Mio. m<sup>3</sup> während des Hochwassers im August 2002 und von rund 0,56 Mio. m<sup>3</sup> während des Hochwassers von 2013 (BMLFUW, 2015). Auf den Überflutungsflächen (Überstromstrecke Wallsee) zwischen Strom-km 2112 und 2100 lagerten sich während des Hochwassers im August 2002 rund 0,56 Mio. m<sup>3</sup> und während des Hochwassers 2013 rund 1,10 Mio. m<sup>3</sup> ab (BMLFUW, 2015). Im

nördlichen Machland (Strom-km 2100 - 2085) sedimentierten im Jahr 2002 1,7 Mio. m<sup>3</sup> und 2013 1,11 Mio. m<sup>3</sup> (BMLFUW, 2015). Im südlichen Machland (Strom-km 2093 - 2083) wurden in den Jahren 2002 bzw. 2013 Anlandungen im Ausmaß von 0,95 Mio. m<sup>3</sup> bzw. 1,41 Mio. m<sup>3</sup> festgestellt (BMLFUW, 2015). Die Ablagerungen wurden von gemischte Kommissionen erfasst und stellen daher die Obergrenze der abgelagerten Mengen dar. Sie überschätzen die Kubaturen zum Teil, da entweder die maximale Ablagerungshöhe herangezogen wurde oder Mittelwerte aufgerundet wurden, sodass die Werte mit einer gewissen Unsicherheit behaftet sind (BMLFUW, 2015).

Im Überflutungsgebiet Tullnerfeld (Strom-km 1972 bis 1945) kam es zu Sedimentablagerungen im Vorland von etwa 1,25 Mio. m<sup>3</sup> beim Hochwasser 2002 und 1,8 Mio. m<sup>3</sup> beim Hochwasser 2013 (BMLFUW, 2015). Zu beachten ist, dass diese Volumina mit großer Unsicherheit behaftet sind, weil sie nicht direkt erfasst wurden, sondern basierend auf bekannten Ablagerungshöhen abgeschätzt wurden (BMLFUW, 2015).

**Tabelle 5. Anlandungen im Vorland im Zuge der Hochwässer 2002 und 2013 (BMLFUW, 2015).**

Maßnahme	Verlandung 2002 (Mio. t)	Verlandung 2013 (Mio. t)	
		Berechnung 1	Berechnung 2
Oberwasser Aschach		0,01	0,01
Eferdinger Becken	0,37 (1,30)*	0,67	0,67
Oberwasser Abwinden		0,63	0,63
Unterwasser Abwinden	1,26	1,68	1,68
Überstömstrecke Wallsee	0,67	1,15	2,36
Machland	3,18	3,02	6,20
Tullnerfeld Nord	1,5	2,17	1,13
Unterwasser Freudenau	0,57 (2,0)*	1,04	0,56

\* Die geklammerten Werte sind aus dem Gutachten zum HW 2002 und sind aus heutiger Sicht wesentlich zu hoch. Es lagen keine Messdaten vor und der Ansatz erfolgte so, dass eine optimale Übereinstimmung mit den übrigen (gemessenen) Werten erzielt wird.

### 3.2.4 Sedimentbilanz

Die Veränderungen der Parameter der Sedimentbilanz sind in Abbildung 82 bis Abbildung 85 im Längsverlauf der österreichischen Donau dargestellt. Für die Betrachtung wurde der Zeitraum 2001-2016 ausgewählt, da zu diesem Zeitpunkt das Kraftwerk Freudenau bereits errichtet war und Sohlgrundaufnahmen für die gesamte Strecke vorliegen. Sedimentinput in den österreichischen Donauabschnitt liefert die Sedimentzufuhr von flussaufwärts. Dies umfasst vor allem den Eintrag von Schwebstoff in der Höhe von rund 4,1 Mio. t pro Jahr (deutsche Donau und Inn), während der Geschiebeinput aufgrund der Kraftwerke von flussauf bis einschließlich Engelhartzell unterbrochen wird und daher vernachlässigbar ist. Weitere Sedimentquellen sind Zubringer, die im österreichischen Donauabschnitt einmünden und künstliche Zugaben von Kies im Bereich östlich von Wien (Strom-km 1921 - 1910) (Abbildung 85 - Mitte), um die Sohleintiefung zu reduzieren, welcher Überwiegend aus der Kompensationsbaggerung im Raum Stein-Krems stammt. Würden diese

Kieszugaben nicht stattfinden, wäre die Erosion in der Erhaltungsstrecke (rein rechnerisch) noch viel ausgeprägter. Bei Betrachtung der gesamten österreichischen Donau können Kieszugaben allerdings nur dann als Sedimentquellen betrachtet werden, wenn das Material nicht zuvor an einer anderen Stelle der österreichischen Donau entnommen wurde. Weitere Einträge von Sediment gelangen aus diffusen Quellen und durch Ufererosion in die Donau. Angaben dazu sind nicht bekannt, wobei aber angenommen wird, dass der Eintrag durch Ufererosion vernachlässigbar ist. Zum Sedimentoutput gehören der Sedimentaustrag nach flussab (Abbildung 82), der sich im Mittel aus rund 4,9 Mio t Schwebstoff und 0,38 Mio t Geschiebe (siehe auch Gmeiner et al., 2016 und Liedermann et al., 2018) pro Jahr zusammensetzt. Eine weitere Sedimentsenke, jedoch in einem geringeren Ausmaß, stellt die Vorlandverlandung in den Beckenlagen dar. In Abbildung 83 sind die Bereiche im Längsverlauf der österreichischen Donau dargestellt, in denen während der Hochwasserereignisse 2002 und 2013 nennenswerte Vorlandverlandungen stattfanden. Verlandung in den Bühnenfeldern, die ebenfalls eine Senke darstellen können, und die v.a. am Unterlauf des Rheins eine wichtige Größe der Sedimentbilanz darstellen (Frings und TenBrinke, 2018), dürften an der österreichischen Donau eine untergeordnete Rolle spielen. Baggerungen sind dann als Sedimentsenken zu zählen, wenn das Material aus dem System entnommen und nicht wieder zugegeben wird. Dies wurde an der österreichischen Donau bis zum Jahr 2006 teilweise so praktiziert (Abbildung 84 - Mitte). Danach wurde das gebaggerte Material wieder der Donau zugegeben oder auch in Kiesstrukturen eingebaut und stellt seitdem in der Sedimentbilanz eine neutrale Größe dar (Abbildung 85 - Mitte). Die in Abbildung 84 (Mitte) und Abbildung 85 (Mitte), dargestellten Baggerungen (rote Balken) sind dabei nicht durchwegs mit reinen Entnahmen gleichzusetzen, denn ein Teil davon wurde z.B. wiederverklappt oder in Kiesstrukturen eingebaut. Sowohl Baggerungen als auch Wiederverklappungen, Zugaben oder Bau von Kiesstrukturen können dabei an gleichen Stellen auftreten, und sich überlagern. Stauräume können als (vorrübergehende) Schwebstoffsenken agieren (Abbildung 84 - oben), aber bei Hochwasserereignissen (2002 und 2013) auch wieder Material freigeben. Da in dem betrachteten, relativ kurzen Zeitraum von 2001-2016 zwei sehr große Hochwasserereignisse (2002 und 2013) auftraten, dominiert in diesem Zeitraum vor allem im Stauraum Aschach die Sedimentremobilisierung. Dies ist durch eine erhöhte Schwebstofffracht an der Messstelle Aschach Strombauleitung (Strom-km 2161.27) (Abbildung 82) und eine negative Kubatur im Stauraum Aschach (Strom-km 2162,7 - 2180) (Abbildung 85 - oben) ersichtlich. Die Sohlgrundaufnahmen zeigen, dass sich der Stauraum nach den Ereignissen wieder zu füllen beginnt, aber im Betrachtungszeitraum nicht das Verlandungsniveau wie vor den Hochwasserereignissen erreicht (Kapitel 3.2.1). Hafenbecken und -einfahrten können ebenfalls als (vorübergehende) Sedimentsenken dienen, bei denen durch Baggerungen und anschließender Verklappung im Hauptstrom das Material wieder ins System rückgeführt wird. Daten dazu wurden im Projekt nicht erhoben und sind daher nicht dargestellt. Durch Abrieb können Partikel von Geschiebe zu Schwebstoff übergehen. Da aber in diesem Projekt neben dem Geschiebe auch der Schwebstoff erfasst wird, wird der Abrieb in dieser Betrachtung nicht als Senke gesehen, wie es bei anderen Untersuchungen (z.B. Frings et al., 2019) oft der Fall ist.

Eine Bilanzierung der österreichischen Donau als Gesamtes ist durch die Unterteilung in Einzelabschnitte auf Grund der Kraftwerkskette und dem Einfluss zweier großer Hochwässer schwierig, da es sich nur teil- bzw. zeitweise und rein bezogen auf Schwebstoff um eine Zusammenhängendes System handelt. „Geschiebedurchgängigkeit“ ist nur insofern gegeben, als dass seit 1998 in der Stauwurzel Altenwörth gebaggertes Geschiebe stromab des KW Freudenaus

zugegeben wird. Unterteilt man die österreichische Donau in die einzelnen gestauten und freifließenden Abschnitte so sind im Zeitraum ab Kraftwerkerrichtung bis 2001 (Abbildung 84 - Oben) die Kraftwerke Aschach, Altenwörth, Greifenstein und Ottensheim-Wilhering die größten Sedimentsenken bezogen auf Schwebstoff. Wobei auf das KW Aschach, welches unter direktem Einfluss des Schwebstoffregimes des Inns steht, der mit Abstand größte Teil der Ablagerungen entfällt. Die Schwebstoffablagerungen konzentrieren sich dabei bis auf Aschach auf die ersten Kilometer stromauf der Kraftwerke und in den Stauwurzeln herrscht stellenweise Erosion vor. Die Ausnahme bildet hier das KW Altenwörth in dessen Stauwurzel sich das Geschiebe aus der freifließenden Strecke in der Wachau ablagert. In den Stauräumen Abwinden-Asten und Wallsee-Mitterkirchen sind ein weiterer Faktor die großen Volumina an gebaggertem Sediment (Abbildung 84 - Mitte) welche den Anschein erwecken als würden große Volumina aus den Stauräumen erodiert werden. Hierbei handelt es sich um Baggerungen für den Hochwasserschutz, Gewinnungsbaggerungen sowie Baggerungen für die Unterwassertiefung des KW Abwinden-Asten. Bilanziert man diese Baggerungen mit dem Ergebnis der Sohlgrundaufwertung so zeigt der Stauraum Abwinden Asten über eine längere Strecke Anlandungen, wobei die Erosion im Abschnitt der Durchbruchsstrecke (Linzer Pforte) weiterhin sichtbar bleibt (Abbildung 84 - Unten). Im Stauraum Wallsee-Mitterkirchen wird nach Bilanzierung mit den Baggerungen der Einfluss der Enns sichtbar, welche in einem Überbreiten Bereich in den Stauraum mündet. In den freifließenden Strecken in der Wachau und Östlich von Wien herrscht Erosion vor. Wobei diese Östlich von Wien noch teilweise durch den Zustrom aus dem Bereich stromauf des Ende 1997 fertiggestellten KW Freudenu (Teilstau 1996) kompensiert wird und ab 1996 durch die Geschiebezugabe des Verbunds. Zu Anlandungen kommt es vor allem im Rückstaubereich des jeweiligen stromabliegenden Kraftwerkes (Altenwörth bzw. Gabčíkovo). Bilanziert man die zwei freien fließstrecken mit dem Volumen an gebaggertem Sediment im Zuge der Erhaltung der Wasserstraße (Abbildung 84 - Mitte), so zeigt sich vor allem im Falle der Wachau, dass in der Vergangenheit ein Teil der Eintiefung auf die Kiesentnahme im Zuge der Erhaltung zurückzuführen sind.

Betrachtet man den Zeitraum von 2001 bis heute (Anmerkung: unterschiedliche Endjahre je nach Verfügbarkeit der Sohlgrundaufnahmen) so fungiert am sichtbarsten das Kraftwerk Aschach als Sedimentquelle für Schwebstoff infolge der Remobilisierung während der Hochwässer 2002 und 2013 (Abbildung 85 - Oben). In den Jahren nach den Hochwässern begann der Sedimentationszyklus von neuem und der Stauraum fungiert wieder als Senke für Schwebstoff. Ein Teil der remobilisierten Schwebstoffe wurde direkt im stromabliegenden Stauraum des KW Ottensheim-Wilhering sedimentiert und in den darauffolgenden Jahren durch den Stauraum hindurch und abtransportiert. Dieser Weiter- bzw. Durchtransport zeigt sich auch noch im stromabliegenden Stauraum Abwinden-Asten, ist jedoch nicht mehr sichtbar im weiteren Verlauf der Donau. In den freien Fließstrecken der Wachau und Östlich von Wien herrscht in diesem Zeitabschnitt weiter Erosion vor. Wobei Östlich von Wien im Vergleich der letzten zirka 20 Jahre mit den letzten 10 Jahren die Erosionsraten abnehmen, was auf die Zugabe des Verbunds stromab des KW Freudenaus, das geänderte Geschiebemanagement der viadonau (Rückführung und Wiederverklappung) sowie auf die unterschiedlichen Pilotprojekte (Uferrückbau, Bühnenumbau, ...) zurückgeführt werden kann.

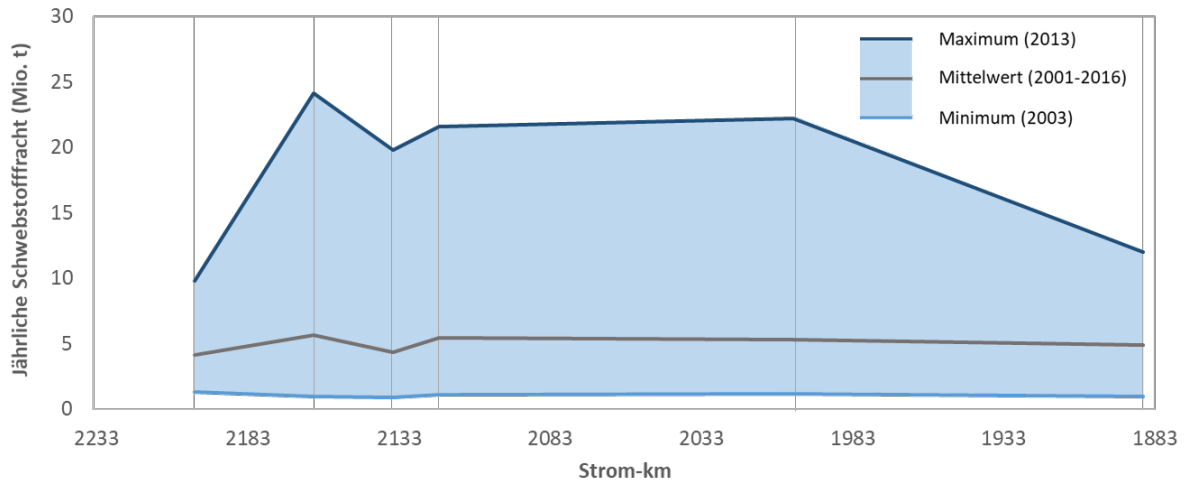


Abbildung 82. Oben: Schwebstoffjahresfrachten an den Messstellen der österreichischen Donau: Maximum (2013; dunkelblau), Mittelwert 2001-2016 (grau) und Minimum (2003; mittelblau); senkrechte graue Linie: Lage der Messstellen (Datengrundlage: ehvd, viadonau, Verbund).

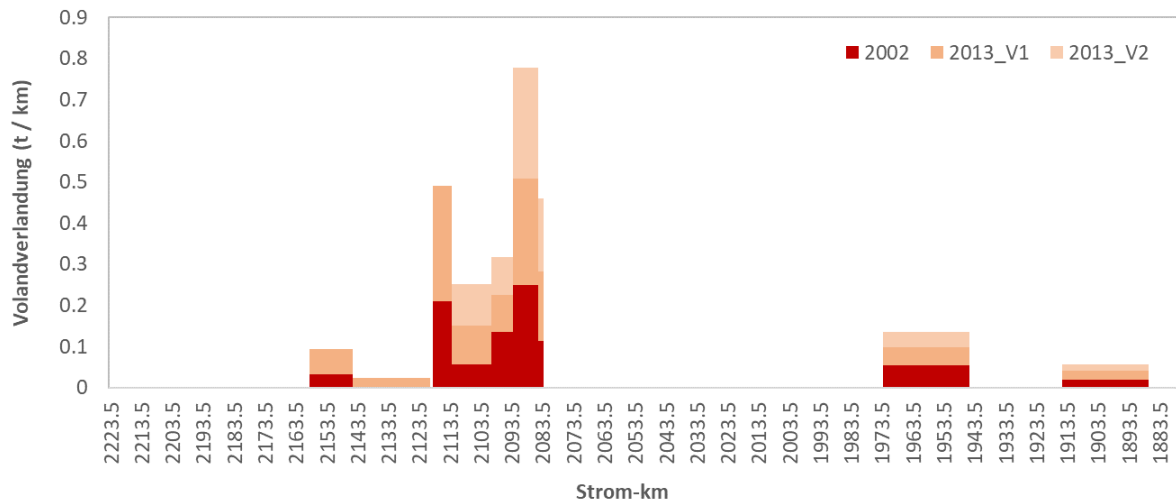


Abbildung 83. Vorlandverlandung im Zeitraum 2001-2016: Hochwasserereignisse 2002 (rot) und 2013 (orange; zwei Berechnungsvarianten) entlang der österreichischen Donau: die Verlandungsvolumina wurden durch die zugehörige Flusslänge dividiert und in Kilometerabschnitten dargestellt (Datenquelle: BMLFUW. 2015).



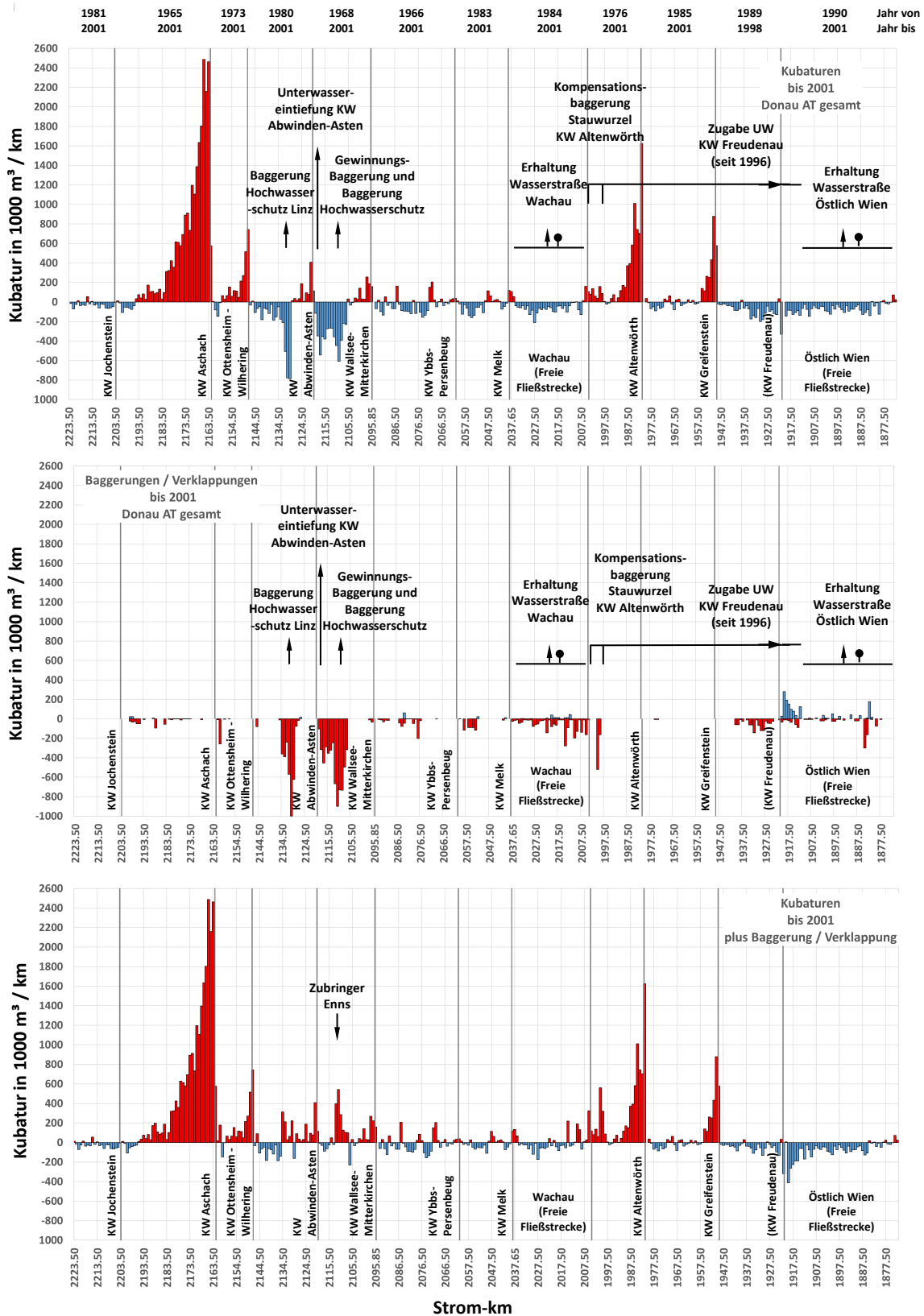


Abbildung 84. Kubaturänderungen im Zeitraum von Kraftwerkerrichtung (KW Jochenstein Aufnahmen erst ab 1981 verfügbar; KW Ybbs-Persenbeug Aufnahmen erst ab 1966; KW Freudenau noch nicht errichtet) bis 2001 an der österreichischen Donau. Oben: Erosion (blau) und Sedimentation (rot) basierend auf Sohlgrundvermessung. Mitte: gebaggerter (rot) sowie wiederverklappter, zugegebener oder in Kiesstrukturen eingebauter (blau) Kies. Unten: Kubaturänderung unter Berücksichtigung der Sohlgrundvermessung sowie Baggerungen, Wiederverklappungen und Zugabe (Datengrundlage: Verbund und viadonau)

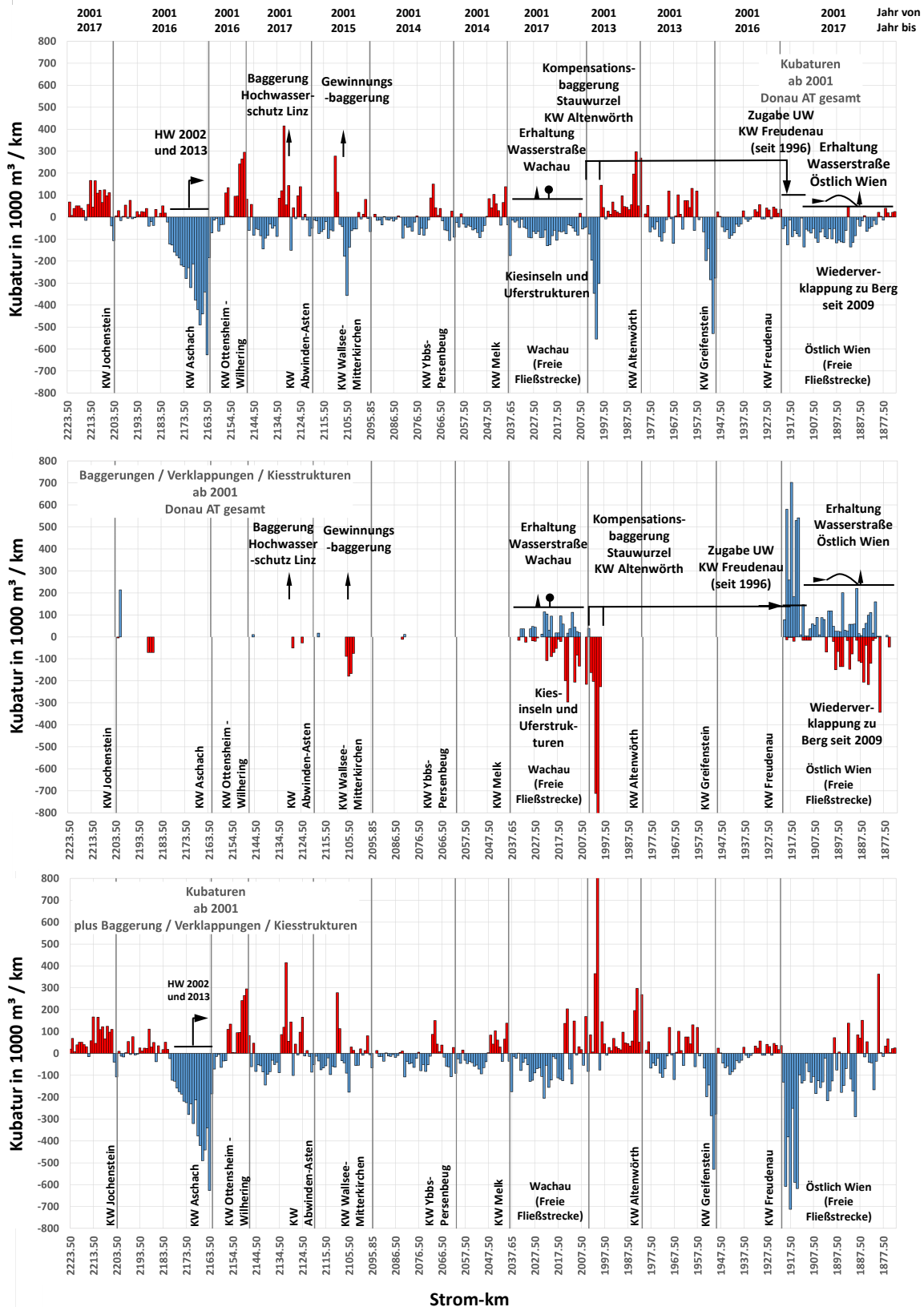


Abbildung 85. Kubaturänderungen im Zeitraum ab 2001 an der österreichischen Donau. Oben: Erosion (blau) und Sedimentation (rot) basierend auf Sohlgrundvermessung. Mitte: gebaggerter (rot) sowie wiederverklappter, zugegebener oder in Kiesstrukturen eingebauter (blau) Kies. Unten: Kubaturänderung unter Berücksichtigung der Sohlgrundvermessung sowie Baggerungen, Wiederverklappungen und Zugabe (Datengrundlage: Verbund und viadonau).

### 3.3 Maßnahmen aus Sicht des Hochwasserschutzes und der Schifffahrt

Abbildung 86 zeigt eine Übersicht über Sedimentmanagementmaßnahmen unterteilt in die drei räumlichen Maßstäbe Einzugsgebiet, Strecke und lokale Ebene sowie nach Maßnahmen in der freien Fließstrecke, im Stauraum und am Kraftwerk bzw. Damm. Im Folgenden werden einige Maßnahmen davon genauer beschrieben, die den Umgang mit Sedimenten im Zusammenhang mit Hochwasserschutz und Schifffahrt verbessern.



Abbildung 86. Übersicht über Sedimentmanagementmaßnahmen (Habersack et al., 2019a).

### 3.3.1 Hochwasserschutz

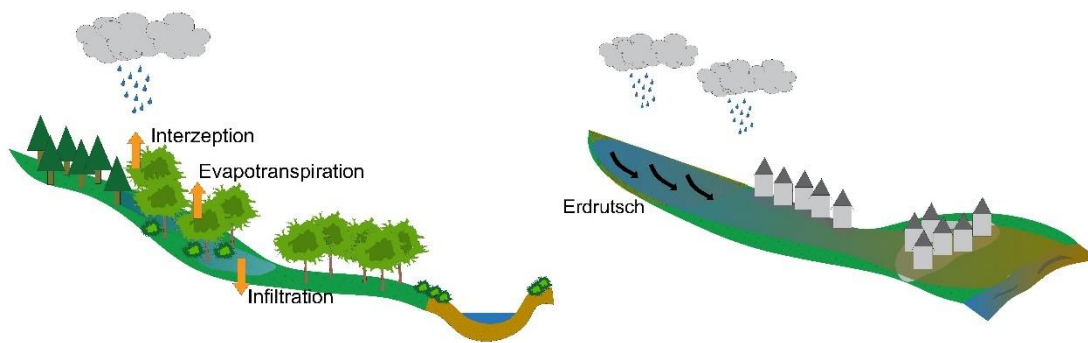
Tabelle 6 gibt einen Überblick über mögliche Maßnahmen zur Verbesserung des Sedimentmanagements aus der Sicht des Hochwasserschutzes. Die angeführten Maßnahmen sind unterteilt nach deren Wirkungsbereich (Einzugsgebiets-, Streckenebene oder lokale Ebene) und werden im folgenden Kapitel genauer erläutert.

**Tabelle 6: Übersicht Sedimentmanagementmaßnahmen in Bezug auf den Hochwasserschutz**

<b>Maßnahme</b>	<b>Wirkungsbereich</b>
Minimierung von anthropogen verursachten Murgängen, Massenbewegungen und Erdbeben	Einzugsgebietsebene
Reduktion des Oberflächenabflusses durch Versickerung und Retention	Einzugsgebietsebene
Vergrößerung des flussmorphologischen Raumbedarfs	Streckenebene
Flussaufweitung (aktiv/passiv)	Streckenebene
Erhöhung der Flusslänge zur Reduktion des Sohlgefälles	Streckenebene
Gewässervernetzung/Förderung der Erosion in Überflutungsflächen	Streckenebene
Öffnen/Entfernen von HW-Schutzdämmen	Streckenebene
Verlagern/Zurücksetzen von HW-Schutzdämmen	Streckenebene
Entfernung von Uferreihen (Ufererosion/mechanisch)	Streckenebene
Renaturierung von Feuchtgebieten	Streckenebene
Lokale Ufersicherung	Lokale Ebene

#### 3.3.1.1 Minimierung von anthropogen verursachten Murgängen, Massenbewegungen und Erdbeben

Raumplanung kann dazu beitragen, übermäßige Murgänge, Massenbewegungen und Erdbeben zu regulieren. Zum Beispiel, indem sie regelt, welche Gebiete von der Bebauung freigehalten werden sollen, wo die Bebauung akzeptabel ist und in welchem Ausmaß. Wenn strukturelle Störungen von (steilen) Hängen vermieden werden und diese Gebiete ungestört bleiben, kann das Potenzial von Massenbewegungen bzw. das Erosionspotenzial minimiert werden. Häufige vom Menschen verursachte Einflussfaktoren, die das Potenzial für Erdbeben beeinflussen, sind eine verstärkte Urbanisierung und Verbauung, die Abholzung und Beseitigung tief wurzelnder Vegetation, Veränderungen oder Störungen der Entwässerungsvorgänge von Grund- und Oberflächenwasser, die Destabilisierung von Hängen (Dai et al., 2002; Turner, 2018) oder schlecht situierte Dämme. Anthropogen verursachte Murgänge können auch durch die Produktion von Gesteinen in Bergwerken und Steinbrüchen, Ablagerungen von Erd- und Baumaterial während der Bauphase von z.B. Straßen entstehen. Der Verlust der Vegetationsdecke beispielsweise wirkt sich destabilisierend auf den Boden aus, wenn die ausgedehnten Wurzelsysteme, die den Boden festigen, weitgehend verschwunden sind und überschüssiges Wasser, das früher von der Vegetation genutzt wurde, nun im Boden verbleibt.



**Abbildung 87. Links: Vegetation stabilisiert den Hang und vermindert den Oberflächenabfluss; Rechts: Strukturelle Störung von Hängen und mangelnde Vegetation erhöhen den Oberflächenabfluss und das Risiko von Massebewegungen**

Dieses überschüssige Wasser führt zu einer Hangsättigung des Bodenprofils und gilt als Hauptursache für Erdrutsche und deren Auftreten. Das Wasser steht in direktem Zusammenhang mit dem Niederschlag, wobei Geologie, Bodentyp und Topographie zu den mitbestimmenden Faktoren zählen (Highland and Bobrowsky, 2008). Das Management von Erdrutschen bedeutet, das Wasser im und um das betroffene Gebiet herum zu managen. Die Wasserabfuhr vom Standort durch den Bau technischer Strukturen oder die Verbesserung der Entwässerung sowie die Erhöhung des Wasserverbrauchs durch vermehrte Vegetation sind eine der wichtigsten Methoden zur Lösung des Problems (Highland and Bobrowsky, 2008).

Es gibt eine Vielzahl von naturbasierten Lösungen, um Naturgefahren zu verhindern und Erosionsrisiken in steilen Gebieten zu verringern. Einige von ihnen sind z.B. die Massenstabilisierung zur Verhinderung von Erdrutschen durch spezielle Bepflanzungen und Schutzwälder, die Steinschläge verhindern und die Menge und Geschwindigkeit des Oberflächenabflusses mit verschiedenen Pflanzenarten reduzieren (Alpine Convention, 2019). Diese Schutzfunktion wird oft bestehenden Wäldern und Lebensräumen zugewiesen, daher ist die Wiederherstellung der Schutzvegetation/des Schutzwaldes ein weiterer wichtiger Punkt, um deren Funktionalität zu gewährleisten (Alpine Convention, 2019).

### **3.3.1.2 Reduktion des Oberflächenabflusses durch Versickerung und Retention**

Als eine natürliche Retentionsmaßnahme zielt diese Aktivität darauf ab, den Oberflächenabfluss zu verringern und durch die Verbesserung natürlicher Retention ein natürlicheres Abflussregime wiederherzustellen. Dies ist die bevorzugte Lösung, weil damit das Problem des übermäßigen Oberflächenabflusses und der Erosion an der Quelle behandelt wird. Ziel dieser Maßnahme ist die Verringerung der Bodenversiegelung, d.h. die Minimierung des zusätzlichen Flächenverbrauchs für Siedlungszwecke und Infrastruktureinrichtungen durch administrative Beschränkungen. Die Erhaltung von Grünflächen und natürlicher Bodenbedeckung verringert den Oberflächenabfluss, was zu einer erhöhten Retention von Wasser und Sedimenten führt. Dadurch gelangen weniger Sedimente in die Vorfluter. Diese Maßnahme den Hochwasserschutz bzw. reduziert Hochwasserspitzen, indem die Versickerungsleistung sowie die Grundwasserneubildung erhöht werden. Allerdings kann die Wirkung bei extremen Niederschlagsereignissen begrenzt sein, wenn der Boden übersättigt ist und dadurch sein Retentionsvermögen verliert. Eine Alternative im kleineren Maßstab, die das Problem nicht an der Quelle löst, ist die Reduzierung von Abflussspitzen bei Niederschlagsereignissen durch technische Rückhaltmaßnahmen wie Retentions- oder Versickerungsbecken. Sie sind so konzipiert, dass sie eine Rückhaltewirkung haben oder als Absetz-

oder Filterbecken dienen. Letztere können auch Feinsedimente zurückhalten, die je nach der Menge der abgesetzten Sedimente entfernt werden müssen. Es gibt zwei verschiedene Arten von Retentionsbecken: Jene Retentions- oder Versickerungsbecken, die in der Regel bewachsen und bei Trockenwetter frei von Wasser sind und jene Retentionsteiche oder -becken, die bei Trockenwetter Wasser enthalten und zusätzliche Speicherkapazitäten zur Dämpfung des Oberflächenabflusses bieten (NWRM, 2015). Versickerungsbecken ermöglichen im Vergleich zu Rückhaltebecken das Eindringen von Wasser in den darunterliegenden Boden. Indem sie den Regenwasserabfluss verringern, tragen sie auch dazu bei, übermäßige Erosion bzw. den Eintrag von Feinsedimenten in Flüsse zu reduzieren.

### 3.3.1.3 Vergrößerung des flussmorphologischen Raumbedarfs

Der minimale flussmorphologische Raumbedarf ( $FMRB_{min}$ ) ist definiert als die Flussbreite, die von Gebäuden, Infrastruktur und anderen anthropogenen Nutzungen freigehalten werden sollte, um im Falle größerer Hochwasserereignisse Raum für morphologische Umlagerungen zur Verfügung zu haben und damit Schäden zu reduzieren (Habersack et al., 2010). Er umfasst Gebiete Ufer- und Überflutungsbereichen, die bei Hochwasser morphologischen Veränderungen (z.B. Verwerfungen, Aufweitungen) ausgesetzt sind. Nach Krapesch et al. (2011) beträgt der  $FMRB_{min}$  bei Hochwässern, die ein 100-jährliches Wiederkehrintervall überschreiten, das Drei- bis Siebenfache der Breite des bestehenden Flussbetts (gemessen an den Flussufern), wobei aber auch Werte bis zum 14-fachen der Flussbreite beobachtet wurden.

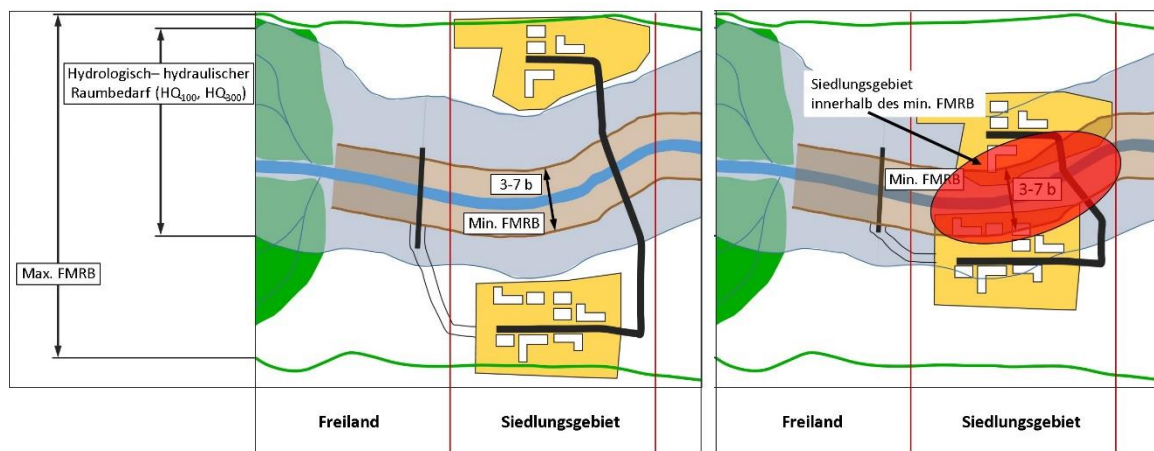


Abbildung 88. Siedlungsgebiet außerhalb (links) und innerhalb (rechts) des minimalen flussmorphologischen Raumbedarfs

Wenn möglich, sollte der potentielle flussmorphologische Raumbedarf, definiert durch den potentielle Überflutungsbereich, angestrebt werden. Die Freihaltung des  $FMRB_{min}$  von Wohngebieten und Infrastruktur schafft mehr Raum für bettbildende Prozesse, verringert die Sohleintiefung sowie das Schadenspotential bei Hochwasserereignissen. Kombiniert man diese Maßnahme mit Renaturierungsmaßnahmen (insbesondere durch Entfernung von Ufersicherungen), führt die so ermöglichte Seitenerosion zu einer Verbreiterung des Flusses und damit zu einer Verringerung der hydrodynamischen Belastung der Flusssohle. Ein vergleichbarer Ansatz ist das Konzept des erodierbaren Flusskorridors, bei dem ein Korridor im alluvialen Überflutungsbereich definiert wird, innerhalb dessen die Erosion nicht durch bauliche Maßnahmen reguliert wird (Piegay et al., 2005). Es wird versucht, ein Ausgleich zwischen Ökologie und Wirtschaft zu schaffen, indem man den Fluss innerhalb des definierten Korridors sich frei bewegen lässt und die Infrastruktur außerhalb des Korridors schützt. Eine weitere Maßnahme, die sich im Zusammenhang mit der Hydrologie in

Einzugsgebieten mit dem Raumbedarf von Fließgewässern befasst, ist z.B. die Gefahrenzonenplanung. In diesem Fall werden Flächen für mögliche zukünftige Maßnahmen oder Flächen mit Hochwasserrückhaltepotenzial sowie jene Bereiche, die für die Hochwasserabfuhr erforderlich sind, ausgewiesen (BMNT, 2018b). Ziel ist es, für etwaige zukünftige Maßnahmen im Rahmen des Hochwasserrisikomanagements den notwendigen Raum für Flüsse wiederherzustellen oder zu erhalten.

#### **3.3.1.4 Flussaufweitung (aktiv/passiv)**

Regulierte Flüsse neigen dazu, in vertikaler Richtung instabil zu werden, wenn der Sedimenteintrag sowie die Flussbreite zu gering sind und keine Ufererosion stattfinden kann (SEPA, 2010). Dies führt einerseits zu verstärkter Tiefenerosion und andererseits zu erhöhten Ablagerungen in flussabwärts gelegenen Abschnitten. Durch Aufweitungen wird das ursprüngliche Regulierungsprofil vergrößert und dem Fluss ermöglicht, einen natürlicheren und ausgeglicheneren Zustand mit reduzierten Erosions- und Sedimentationsprozessen zu entwickeln. Aufweitungen sind besonders dann erfolgreich, wenn der verbreiterte Flussabschnitt lang ist und eine intakte Geschiebezufuhr von flussaufwärts gewährleistet ist (Hunziker, 2012). Passive Flussaufweitungen beinhalten die Entfernung von Regulierungsbauwerken (z.B. Buhnen) oder Ufersicherungen sowie die Entfernung oder Rückverlegung von HW-Schutzdämmen. Dadurch werden eigendynamische, morphologische Prozesse initiiert. Diese lateralen Prozesse können durch zusätzliche ingenieurbioökologische Maßnahmen, wie z.B. das Platzieren von größerem Totholz am Flussufer, weiter verbessert werden. Künstliche oder aktive Aufweitung bedeutet, dass die Regulierungsbauwerke entfernt werden und die Flussbreite aktiv durch z.B. Ausbaggern vergrößert wird (Habersack und Piegay, 2007). Seitenerosionsprozesse führen zu einem erhöhten kurzfristigen Sedimenteintrag während aufgrund der vergrößerten Flussbreite die Sohlschubspannung und Fließgeschwindigkeit und damit die Sohleintiefung reduziert werden. Außerdem wird die Transportgeschwindigkeit des Geschiebes herabgesetzt, wodurch die Sedimente länger im Fluss verbleiben. Aufweitungen können zu einem kurzfristigen Sedimentdefizit im stromabwärts gelegenen Flussabschnitt führen. Daher kann es von Vorteil sein, diese Maßnahme von flussab in Richtung flussauf umzusetzen. Zusätzlich profitiert die Habitatvielfalt von dieser Maßnahme, da die hydromorphologische Diversität in Bezug auf Fließgeschwindigkeiten, Wassertiefen und Korngrößen zunimmt (Jähnig et al., 2009). Eine zu starke Aufweitung kann negative Auswirkungen auf die nahe gelegene Infrastruktur, die Schifffahrtsverhältnisse (Fahrwassertiefe) oder Hochwasserschutzmaßnahmen bzw. die Hochwasserspiegel haben. Daher müssen möglicherweise zusätzliche Maßnahmen, wie z.B. der Einbau von Buhnen im Vorland, in Betracht gezogen werden.

#### **3.3.1.5 Erhöhung der Flusslänge zur Reduktion des Sohlgefälles**

Im Sinne des Hochwasserschutzes leisten diese Maßnahmen einen positiven Beitrag, indem der Fließweg und somit die Abflussretention erhöht wird und somit das Hochwasserrisiko verringert wird. Dies gilt vor allem, wenn mehrere dieser Maßnahmen in einem Flussgebiet umgesetzt werden und die Lauflänge dementsprechend zunimmt. Zu solchen Maßnahmen gehören die Wiederanbindung von abgetrennten Altarmen und Mäandern in Kombination mit der Verlegung des Hauptgerinnes. Eine Erhöhung der Flusslänge und eine Reduktion des Sohlgefälles kann auch das Sedimentmanagement auf regionaler Ebene in freien Fließstrecken sehr effektiv verbessern. Diese Renaturierungsmaßnahmen reduzieren die Schubspannung, die Fließgeschwindigkeit sowie die Sohleintiefung und stabilisieren damit das Flussbett. Dadurch verringert sich auch die Transportgeschwindigkeit des Geschiebes, wodurch die Sedimente länger im Fluss verbleiben.

Darüber hinaus profitiert die Habitatvielfalt von dieser Maßnahme. So nimmt beispielsweise die hydromorphologische Variabilität in Bezug auf Fließgeschwindigkeiten, Wassertiefen und Korngrößen zu, sowie bieten die neu geschaffenen oder wieder angeschlossenen Mäander auch Lebensräume für eine Vielzahl von aquatischen und terrestrischen Lebewesen (Jähnig et al., 2009). Diese Maßnahme zielt auf die Schaffung eines dynamischen Gleichgewichts ab. Ohne Geschiebezufuhr von flussaufwärts könnten jedoch die morphodynamischen Prozesse mit der Zeit wieder abklingen, wodurch die Sohleintiefung bestehen bleiben würde.

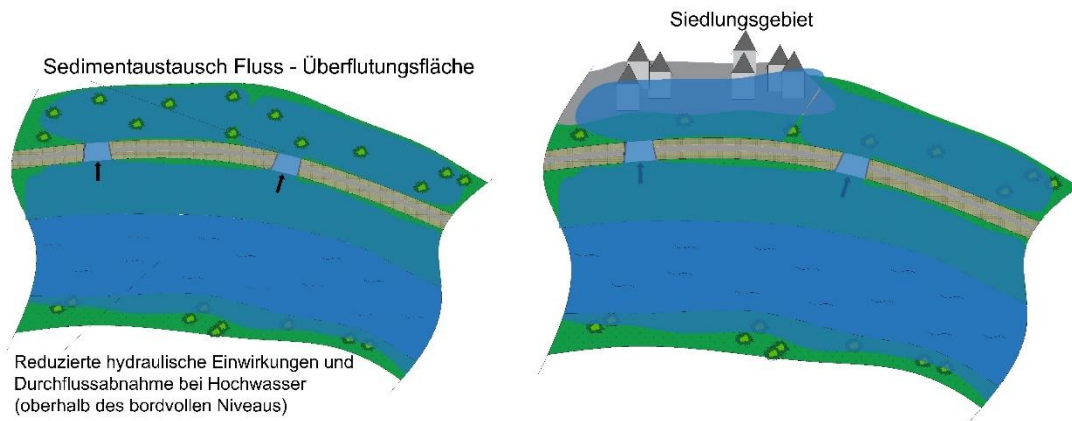
#### **3.3.1.6 Gewässervernetzung/Förderung der Erosion in Überflutungsflächen**

Diese Maßnahme beinhaltet die Wiederanbindung von bestehenden Seiten- und Altarmen oder die Schaffung neuer Seitenarme, möglichst auch bei Niederwasserbedingungen. Dadurch wird der laterale Austausch zwischen Hauptgerinne und Vorland verbessert. Der Hochwasserschutz profitiert von der erhöhten Retentionswirkung und somit niedrigeren Wasserständen während Hochwasserereignissen. Der Sedimenttausch zwischen Fluss und Umland kann durch die Beseitigung von Barrieren und Ufersicherungen in den Seitenarmen, eventuell unterstützt durch Baggerarbeiten, zusätzlich verbessert werden. Infolgedessen wird die Abflussmenge im Hauptstrom verringert, was zu einer Reduktion der Sohlschubspannung und der Sohleintiefung führt. Um Feinsedimentablagerungen im Seitenarm zu vermeiden, müssen Durchfluss und Wasserspiegelschwankungen sichergestellt werden. Während höherer Durchflüsse können aufgrund der hohen Schubspannungen übermäßige Feinsedimentablagerungen im Seitenarm verhindert werden. Darüber hinaus werden Sedimenttransport und -dynamik aufgrund der morphodynamischen Prozesse in den Seitenarmen verbessert. Außerdem profitiert die Ökologie von dieser Maßnahme, da die charakteristische Insel- und Flusslandschaft wiederhergestellt und die Habitatvielfalt verbessert wird, aquatische Lebewesen dauerhafte Rückzugsgebiete finden (Buijse et al., 2002) und auch vor schifffahrtsbedingten Wellen geschützt werden. Des Weiteren wird die Grundwasserneubildung verbessert. In schiffbaren Flüssen muss die Menge des in den Seitenarm umgeleiteten Wassers, insbesondere bei Niederwasser, berücksichtigt werden, um die Fahrwassertiefen nicht negativ zu beeinflussen.

#### **3.3.1.7 Öffnen/Entfernen von HW-Schutzdämmen**

Die lokale Öffnung von HW-Schutzdämmen oder ihre vollständige Entfernung kann eine Option sein, um die Retentionskapazität zu erhöhen und Abflussspitzen und Wasserstände zu reduzieren. Darüber hinaus wird die hydraulische Einwirkung auf den Hauptstrom verringert und der Sedimenttausch zwischen Fluss und Überflutungsflächen erhöht.





**Abbildung 89.** Links: Öffnen eines HW-Schutzdammes zur Erhöhung der Retention; Rechts: Negatives Beispiel für eine geöffneten HW-Schutzdamm im Bereich eines Siedlungsgebietes

Diese Maßnahme trägt auch zur Stabilisierung des Sohniveaus bei, indem die Schubspannungen und die Sedimenttransportkapazität bei Durchflüssen oberhalb des bordvollen Niveaus reduziert werden. In der Folge schafft bzw. erhält diese Maßnahme auch unterschiedliche flussau-typische Charakteristika und erhöht somit die Habitatvielfalt (Roni et al., 2005). Allerdings müssen kritische Infrastrukturen und Siedlungen in der Nähe beachtet werden, um deren Hochwasserschutz nicht zu gefährden. Daher ist diese Maßnahme nur in Gebieten mit ausreichendem Raumangebot und ohne kritische Infrastruktur umsetzbar.

### 3.3.1.8 Verlagern/Zurücksetzen von HW-Schutzdämmen

Das Verlagern/Zurücksetzen von Dämmen wird in Bezug auf den bestehenden Damm festgelegt (Dahl et al., 2017). Das Abrücken eines bestehenden Damms von einem Fluss schafft mehr Raum zur Hochwasserabfuhr, verringert die Hochwasserstände und die hydraulische Belastung auf den Damm selbst. Das vergrößerte Abflussquerschnitt verringert auch die Fließgeschwindigkeiten bzw. die Schubspannungen und reduziert somit die Sedimenttransportkapazität im Hauptstrom, was wiederum der Sohleintiefung entgegenwirkt. Weitere positive Aspekte sind ein erhöhter Sedimentaustausch mit dem Umland bei höheren Durchflüssen und eine Reduktion von Hochwasserrisiken und -schäden durch erhöhte Retentionswirkung und niedrigere Hochwasserstände. Eine geringere Dammhöhe und die Platzierung des Damms auf stabilerem Untergrund weiter entfernt vom Hauptgerinne können die Kosten für die Damm-Abrückung verringern (USACE, 2012). Das Zurücksetzen von Dämmen kann auch zu geringeren Kosten für Betrieb und Instandhaltung sowie zu einem geringeren Versagensrisiko führen (USACE, 2012; Smith et al., 2017). Ein weiterer Vorteil ist, dass durch diese Maßnahme flussau-typische Charakteristika geschaffen bzw. erhalten werden und die Habitatvielfalt erhöht wird (Roni et al., 2005). Außerdem kann das Verlagern/Zurücksetzen von Dämmen potentiell zur Wiederherstellung von ökosystemrelevanten Elementen der Flussaue beitragen (Rohde et al. 2005). Diese Maßnahme kann Änderungen in der Landnutzung erfordern und ist nur in Gebieten umsetzbar, in denen ausreichend Raum zur Verfügung steht und keine kritische Infrastruktur vorhanden ist. Darüber hinaus kann sie die Erweiterung von Siedlungsgebieten begrenzen.

### 3.3.1.9 Entfernung von Uferrehnen (Ufererosion/mechanisch)

Uferrehnen entstehen als Folge der Ablagerung von Feinsedimenten an Flussufern bei Ausuferungen. Aufgrund von Flussregulierungen können diese Ablagerungen nicht auf natürliche Weise durch

Seitenerosion abgetragen werden. Die Beseitigung kann entweder mechanisch oder durch Entfernen der Ufererhörungen erfolgen, um Seitenerosion wieder zu ermöglichen. Die Entfernung von Ufererhörungen zielt darauf ab, den Wasserstand bei bordvollem Durchfluss zu senken und die laterale Vernetzung zwischen Hauptstrom und Vorland zu verbessern.

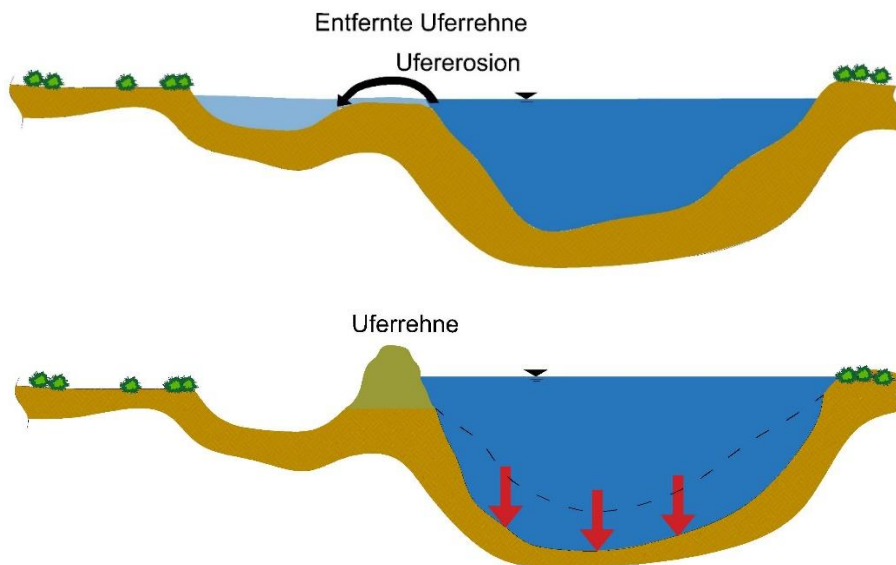
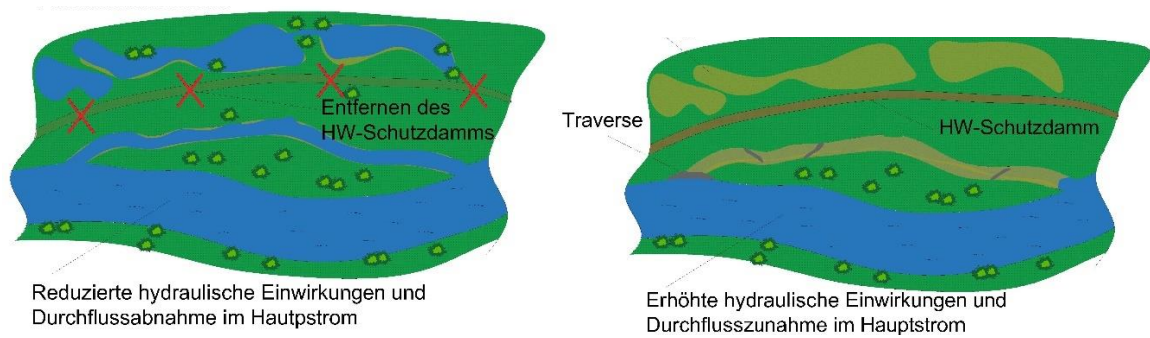


Abbildung 90. Oben: Entfernung von Ufererhörungen - gesenkter Wasserstand bei bordvollem Durchfluss und verbesserte laterale Vernetzung zwischen Hauptstrom und Vorland; Unten: Ufererhöhung erhöht den bordvollen Wasserstand und reduziert das Abflussprofil

In Flüssen mit einem schmalen Überflutungsbereich können diese Ablagerungen den Querschnitt verringern und sich auf die Hochwasserabfuhr auswirken, was wiederum den Hochwasserschutz beeinträchtigen kann. Daher hat ihre Beseitigung positive Auswirkungen im Hinblick auf den Hochwasserschutz. Diese Auswirkungen müssen jedoch für jeden konkreten Fall individuell bewertet werden. Das Sedimentregime profitiert von dieser Maßnahme, da die Schubspannungen im Hauptstrom reduziert werden auf Grund der früheren Ausuferung, was der Sohleintiefung entgegenwirkt.

### 3.3.1.10 Renaturierung von Feuchtgebieten

Die Reaktivierung ehemaliger Feuchtgebiete kann langfristig den Wasserrückhalt erhöhen und Hochwasserereignisse dämpfen (Camaro-D, 2019). Diese Maßnahme zielt darauf ab, die laterale Dimension eines Flusssystemes (Fluss-Uferbegleitsaum-Überflutungsfläche), die infolge anthropogener Eingriffe beeinträchtigt bzw. unterbrochen ist, wiederherzustellen bzw. zu verbessern (Ward, 1998). Frühere Überflutungsgebiete und Feuchtgebiete waren u.a. durch eine hohe morphologische Dynamik und Altarme gekennzeichnet. Diese Charakteristika veränderten sich im Laufe der Zeit, sodass notwendige Renaturierungsmaßnahmen zur Verbesserung der ökologischen Situation erforderlich wurden. Die Restaurierung von Feuchtgebieten umfasst Techniken wie das Öffnen oder Entfernen von Dämmen, um die hydrologische Charakteristik eines Feuchtgebiets wiederherzustellen. Auch der Rückbau von Entwässerungsgräben und Drainagen wirkt sich direkt auf die Hochwasserereignisse aus, indem die Retentionskapazität des Überflutungsgebiets erhöht wird (Camaro-D, 2019).



**Abbildung 91.** Links: Wiederhergestelltes Feuchtgebiet Rechts: Keine Feuchtgebiete infolge Entkoppelung Fluss und Umland

(Wiederhergestellte) Feuchtgebiete halten Wasser zurück, was die Laufzeit zum Vorfluter verlängert und dadurch Hochwasserspitzen reduziert. Dies wiederum verringert die Sedimenttransportkapazität im Hauptgerinne und reduziert auch den Feinsedimenteintrag in Flüsse. Feuchtgebiete sind gute Sediment- und Schadstofffilter und haben daher auch positive Auswirkungen auf die Wasserqualität. Ihre Restaurierung zielt auch darauf ab, ökologische Prozesse und Funktionen in beeinträchtigten oder zerstörten Feuchtgebieten wiederherzustellen, einschließlich der Schaffung neuer Lebensräume. Sobald die typische hydrologische Charakteristik wiederhergestellt ist, kann sich die Feuchtgebietsvegetation erholen und die Tierwelt kann den wiederhergestellten aquatischen Lebensraum nutzen. Die Schaffung künstlicher Feuchtgebiete in städtischen Gebieten kann auch zur Hochwasserdämpfung, zur Verbesserung der Wasserqualität, sowie zur Verbesserung von Lebensräumen und des Landschaftsbildes beitragen.

### 3.3.1.11 Lokale Ufersicherung

Die laterale Bewegung eines Flusses mit Erosion und Ablagerung von Sohl- und Ufermaterial ist ein natürlicher Prozess. Wenn sich jedoch kritische Infrastrukturen oder Siedlungen in der Nähe befinden, ist es notwendig, diese zu schützen um vor allem auch im Hochwasserfall Uferanrisse zu vermeiden. Maßnahmen zur Verbesserung der Situation sollten zunächst versuchen, die Ursachen zu behandeln, wie zum Beispiel die Verringerung nicht natürlicher Abflussspitzen durch verbesserte Retention im Einzugsgebiet, die Anpassung des Schwallbetriebs oder die Reduktion der Sohleintiefung. Auch die Einzäunung von Nutztieren, sodass diese keine Trittschäden an den Uferböschungen verursachen und damit die schützende Vegetation zerstören (Belsky et al., 1999) kann eine Option sein, um Ufererosion zu verhindern oder zu reduzieren. Wenn die oben genannten Maßnahmen nicht angewendet werden können oder zu lange brauchen würden, um wirksam zu sein, können Flussufer lokal stabilisiert werden, um gefährdete kritische Infrastrukturen oder Siedlungen zu schützen. Dies sollte vorzugsweise durch den Einsatz ingenieurbioologischer Techniken wie bewachsene Krainerwände, Weidenspreitlagen oder Uferfaschinen geschehen, sofern sie der zu erwartenden Belastung standhalten können.

### 3.3.2 Schifffahrt

Tabelle 7 gibt einen Überblick über mögliche Maßnahmen zur Verbesserung des Sedimentmanagements aus der Sicht der Schifffahrt. Die angeführten Maßnahmen sind unterteilt nach deren Wirkungsbereich (Streckenebene oder lokale Ebene) und werden im folgenden Kapitel genauer erläutert.

**Tabelle 7: Übersicht Sedimentmanagementmaßnahmen in Bezug auf die Schifffahrt**

<b>Maßnahme</b>	<b>Wirkungsbereich</b>
Grobkornzugabe (Granulometrische Sohlverbesserung)	Streckenebene
Optimiertes Geschiebemanagement	Streckenebene
Verlegen/Einengen der Schifffahrtsrinne	Streckenebene
Sedimentzugabe	Lokale Ebene
Optimierung von Regulierungsbauwerken zur Reduktion von Sedimentation	Lokale Ebene
Optimierung von Regulierungsbauwerken zur Reduktion von Erosion	Lokale Ebene
Geschiebefang (als Teil des optimierten Geschiebemanagements)	Lokale Ebene

### **3.3.2.1 Grobkornzugabe (Granulometrische Sohlverbesserung)**

Diese Maßnahme beinhaltet die Zugabe von grobem Kies, der innerhalb des natürlichen Korngrößenspektrums liegt. Ziel ist es, die Häufigkeit und Menge des transportierten Kieses zu reduzieren. In Bezug auf die Erhaltung der Wasserstraße für die Binnenschifffahrt zielt diese Maßnahme darauf ab, den Erhaltungsaufwand bzw. den Umfang von Stromsohlenbaggerungen bei Seichtstellen zu reduzieren. Diese Maßnahme ist abhängig von der Größe und der Korngrößenverteilung des zugegebenen Kieses, der sich mit dem natürlichen Sohlsubstrat vermischen sollte, um den mittleren Korndurchmesser des Sohlmaterials zu erhöhen. Diese Maßnahme erhöht die kritische Sohlschubspannung, reduziert die Sedimenttransportkapazität und verringert die Sohleintiefung, wodurch das Sohlenniveau langfristig dynamisch stabilisiert wird. Es muss jedoch betont werden, dass es letztlich nicht darum geht, den Geschiebetransport zu stoppen, sondern nur darum, den Sedimenttransport zu reduzieren und trotzdem morphodynamische Prozesse im Flussbett zu ermöglichen, d.h. Erosion, Transport und Ablagerung. Bislang gibt es wenige praktische Erfahrungen, allerdings haben erste Pilotstudien in der Donau stattgefunden, z.B. in Deutschland und in Österreich östlich von Wien (Liedermann et al., 2016). Diese Studien haben gezeigt, dass zur Erzielung nachhaltiger Effekte die optimale Korngröße für jeden Einzelfall separat definiert werden muss.

### **3.3.2.2 Optimiertes Geschiebemanagement**

Die Hauptziele dieser Maßnahme sind sowohl die Entfernung von lokalen Anlandungen als auch die Verringerung der Erosion. Die Baggerungen selbst haben den Zweck lokale Anlandungen in der Fahrinne zu entfernen um somit sichere Bedingungen an kritischen Seichtstellen für die Binnenschifffahrt zu gewährleisten. Die Zugabe des Baggermaterials wirkt der Sohleintiefung entgegen, indem die Sedimente stromaufwärts oder stromabwärts in Bereiche umgelagert werden, in denen Sedimente fehlen bzw. die Wassertiefe groß genug ist. Das übergeordnete Ziel ist, die Sedimente im Flusssystem zu halten, anstatt sie zu entfernen und Erosionstendenzen zu verstärken. Eine Geschiebefalle kann Teil dieser Maßnahme sein, um einerseits das Geschiebe aufzufangen, bevor es seichte Abschnitte erreicht, und andererseits um Sedimente für das weitere Geschiebemanagement zur Verfügung zu haben (WSD-SW, 2007; viadonau, 2018).

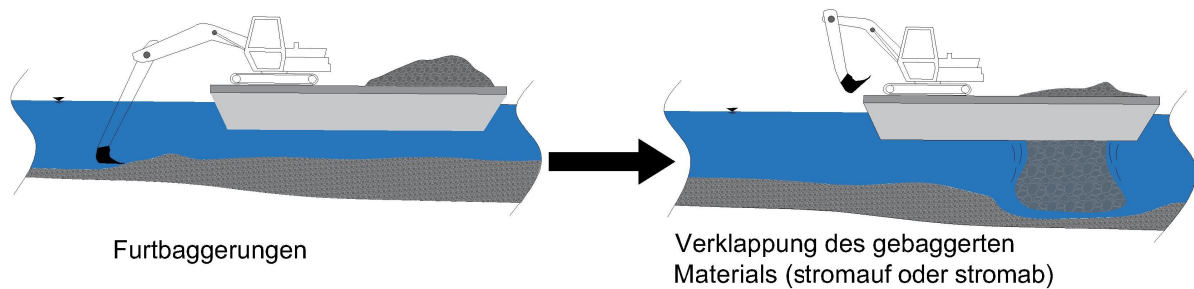


Abbildung 92: Furtbaggerung mit anschließender Wiederverklappung des gebaggerten Sediments im Fluss

Durch die Zugabe von gröberem Sedimenten kann die Maßnahme angepasst werden, um den Sedimenttransport zu reduzieren und den Abrieb zu kompensieren, wenn die Sedimente nach dem Baggern flussaufwärts transportiert werden. Dieser Ansatz trägt zur Verbesserung der Schifffahrtsbedingungen bei, während er gleichzeitig dazu dient, das Flussbett dynamisch zu stabilisieren und der Erosion entgegenzuwirken, die häufig durch einen Mangel an Sedimenten aufgrund der Rückhaltung an Querbauwerken und eine erhöhte Transportkapazität aufgrund der Flussregulierung verursacht wird. Diese Maßnahme verbessert auch die Grundwasser sowie die ökologische Situation, indem der Wasserspiegelabsenkung infolge der Sohleintiefung entgegengewirkt wird.

### 3.3.2.3 Verlagerung/Einengung der Schifffahrtsrinne

Eine Neuausrichtung der Fahrrinne ist in morphologisch dynamischen Flussabschnitten mit ausreichender Breite anwendbar, in denen die morphologischen Prozesse (in diesem Fall Anlandungen) sich nicht über die gesamte Flussbreite erstrecken und somit genügend Raum für die Maßnahme zu Verfügung steht (Platina-2, 2016). Für die Umsetzung dieser Maßnahme, sind regelmäßige Sohlgrundvermessungen in den für die Schifffahrt kritischen Bereichen notwendig, um die auftretenden morphologischen Prozesse zu erfassen und zu analysieren, sowie um die vorherrschende Dynamik der Flusssohle zu verstehen (Platina-2, 2016).

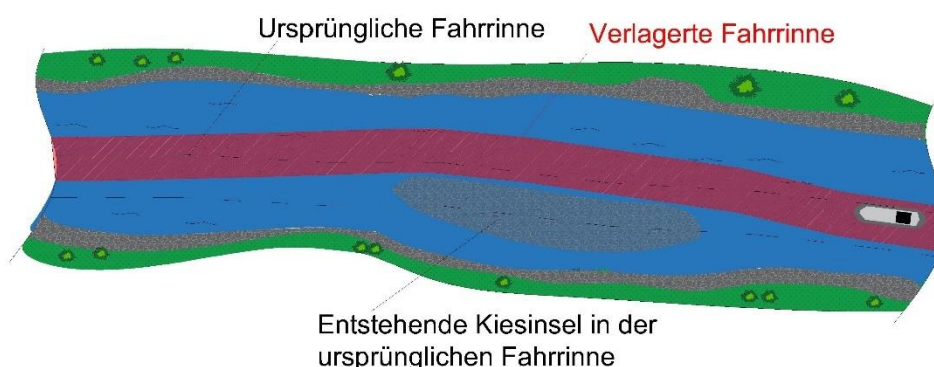


Abbildung 93. Verlagerung der Fahrrinne anstelle von Fahrinnenbaggerung zur Erhaltung der Mindestfahrwassertiefe

Durch die Anwendung dieser betrieblichen Maßnahme können Regulierungs- und Instandhaltungsarbeiten wie Baggerungen reduziert werden. Dieser Ansatz hat kaum Auswirkungen auf den Fluss und ist in der Regel billiger, einfacher und schneller umzusetzen. Darüber hinaus werden natürlichere morphodynamische Prozesse ermöglicht, was sich auch positiv auf die Ökologie

auswirkt. Eine weitere betriebliche Maßnahme zur Verringerung der Auswirkungen des Wasserstraßenmanagements auf das Sedimentregime kann die Einengung der Fahrrinnenbreite bzw. das Ausbaggern einer schmalen Tiefenrinne sein, welche nicht gesamte Breite der Fahrrinne umfasst.

#### **3.3.2.4 Kieszugabe**

Die Kieszugabe, z.B. durch Verklappung von Material im Hauptgerinne per Schiff oder durch Ablagerung der Sedimente an den Flussufern stromabwärts eines Staudamms oder Wehrs, trägt dazu bei, das Geschiebedefizit zu kompensieren, das durch den Bau von Staudämmen und Wehren entsteht. Abhängig von der Größe des Flusses kann der Transport und die Verteilung der zugegebenen Sedimente entsprechende Abflüsse erfordern. Zum Beispiel kann es notwendig sein, dass stromaufwärts gelegene Stauhaltungen oder Stauseen Wasser ablassen, um einen für den Sedimenttransport hinreichenden Abfluss zu initiieren. Die Menge und Größe der in den Fluss eingebrachten Sedimente sollte auf Analysen und Berechnung eines Sedimentbudgets basieren (Bunte, 2004), mit dem Ziel, den Hochwasserschutz, die Schifffahrt und die Habitatbedingungen nicht zu beeinträchtigen. Das übergeordnete Ziel ist, die Menge an bettbildendem Sediment im Fluss zu erhöhen, den Sedimenttransport und die Durchgängigkeit zu verbessern, den Sedimenttransport und die Sedimentzufuhr auszugleichen. Damit wird die Sohleintiefung bzw. die Degradierung der Sohle im Unterlauf verringert, was letztlich auch die Morphologie verbessert. Die Sedimentzugabe hat dann den größten Nutzen, wenn das Material nicht nur durch die Flussstrecke transportiert wird, sondern wenn der Fluss in der Lage ist, zumindest einen Teil der Sedimente im entsprechenden Abschnitt zu speichern in dem es ihm möglich ist morphologischen Strukturen wie Kiesbänke und -inseln auszubilden. Dies bedeutet, dass Flussrenaturierungen weiter flussab den positiven Effekt der Sedimentzugabe verstärkt, indem die Aufenthaltsdauer von Sedimenten im Fluss erhöht wird. Neben positiven Effekten für das Flussbett, z.B. Anhebung oder Stabilisierung der Stromsohle, kann diese Maßnahme auch die Ökologie verbessern, da höhere Wasserstände durch das höhere Sohlniveau z.B. der Anbindungsdauer von Nebenarmsystemen sowie dem Grundwasserspiegel und der Grundwasserneubildung zugutekommen können. Die Verringerung bzw. das Verhindern von Eintiefungsprozessen dient auch dem Hochwasserschutz, da die Gefahr, durch Unterspülungen von Hochwasserschutzbauten die Flussufer zu destabilisieren, reduziert wird.

#### **3.3.2.5 Optimierung von Regulierungsbauwerken zur Reduktion von Sedimentation**

Diese Maßnahme beinhaltet die Anpassung bestehender Regulierungsbauwerke, wie z.B. Buhnen oder Leitwerke, hinsichtlich deren Länge, Höhe, Abstand und Form. Ziel ist es, die Schubspannungen im Hauptgerinne lokal zu erhöhen und damit die Sedimentation in der Schifffahrtsrinne, zu reduzieren. Dadurch verringert sich der Umfang der Baggerarbeiten, die für die Instandhaltung der Fahrrinne oder aus Gründen des Hochwasserschutzes erforderlich sind (Glas et al, 2018). Diese Maßnahme zielt in erster Linie darauf ab, sichere und nachhaltige Bedingungen für die Binnenschifffahrt (ausreichend Fahrwassertiefe und -breite und Brückendurchfahrtshöhen) zu gewährleisten sowie den Hochwasserschutz sicherzustellen. Ähnliche Effekte lassen sich durch Strukturen im Hauptstrom wie Kiesbänke und -inseln erzielen, wenn diese in die Flusscharakteristik passen. Für den Bau dieser Strukturen können beispielsweise Sedimente aus den Erhaltungsaggerungen verwendet werden. Darüber hinaus können diese morphologischen Elemente wichtige Laichhabitate für Fische, aber auch Habitate für rheophile wirbellose Tierarten darstellen (Jungwirth et al., 2005) und einen gewissen Schutz vor schifffahrtsbedingtem Wellenschlag bewirken. Diese künstlich geschütteten Strukturen müssen gegebenenfalls instandgehalten werden, damit ihre Wirkung langfristig sichergestellt ist. Grundsätzlich müssen sie sorgfältig geplant und

umgesetzt werden, da überdimensionierte Regulierungsbauwerke zu übermäßigen Einengungen des Flusses führen können, die wiederum langfristige Eintiefungstendenzen zur Folge haben können. Auch könnten sich Sedimente, die vom Standort der Maßnahme remobilisiert werden, weiter stromabwärts ablagern, ungünstige Fahrwasserbedingungen schaffen und somit das Problem nur an einen anderen Ort verlagern.

### 3.3.2.6 Optimierung von Regulierungsbauwerken zur Reduktion von Erosion

Diese Maßnahme beinhaltet die Anpassung bestehender Regulierungsbauwerke wie z.B. Buhnen oder Leitwerke hinsichtlich deren Länge, Höhe, Abstand, Ausrichtung und Form. Ziel ist es, die Schubspannungen im Hauptgerinne zu reduzieren und somit die Erosion der Stromsohle zu verringern. Gleichzeitig wird die Aufenthaltsdauer des Sediments im jeweiligen Flussabschnitt erhöht, da der Sedimenttransport reduziert wird. Dies verringert den Erhaltungsaufwand, da das Sediment nicht so schnell im Bereich von Seichtstellen oder auch Geschiebefängen anfällt. Des Weiteren „wachsen“ in Bereichen mit jahrzehntelanger Sohleintiefung Buhnen und Leitwerke über den Regulierungswasserstand heraus und konzentrieren so über einen größeren Durchflussbereich das Wasser im Hauptstrom. Ein Zurücknehmen des Regulierungsgrades wirkt so auch diesem sich selbst verstärkenden Prozess entgegen. Dies trägt auch dazu bei, den Wasserspiegel sowohl des Oberflächenwassers als auch des Grundwassers zu stabilisieren oder anzuheben.

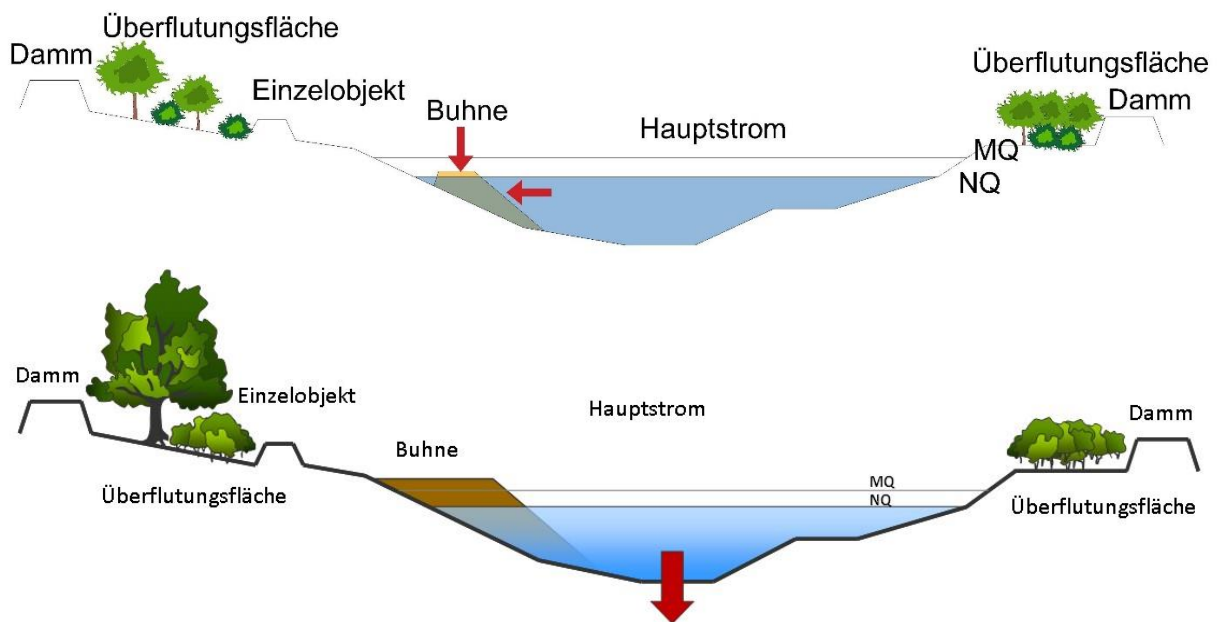


Abbildung 94. Oben: Rücknahme des Regulierungsgrades zur Reduktion der Sedimenttransportkapazität; Unten: Tiefenerosion infolge Regulierung

Diese Maßnahme verringert die Sedimenttransportkapazität, was bei nicht angemessener Umsetzung zu ungünstigen Ablagerungen in der Schifffahrtsrinne führen kann. Daher ist möglicherweise eine adaptive Implementierung erforderlich. Darüber hinaus kann diese Maßnahme durch die Absenkung der Buhnenwurzel zur Erhöhung des ufernahen Abflusses bzw. der Fließgeschwindigkeiten führen. In Kombination mit der Entfernung von Ufersicherungen werden die ökologischen Verhältnisse an den Flussufern verbessert, indem die Morphodynamik erhöht und die Sedimentation im Buhnenfeld reduziert wird (Liedermann et al., 2016).

### **3.3.2.7 Geschiebefang (als Teil des optimierten Geschiebemanagements)**

Die Maßnahme zielt darauf ab, Geschiebe an einzelnen Stellen gezielt aufzufangen, um den stromabwärts gerichteten Sedimenttransport zu kontrollieren. Der Einbau eines Geschiebefangs kann dazu beitragen, den Bedarf an Erhaltungsbaggerungen für die Binnenschifffahrt zu reduzieren, wenn diese vor Seichtstellen/Furten installiert werden (WSD-SW, 2007; viadonau, 2018). Geschiebefänge können außerdem zur Verbesserung des Hochwasserschutzes eingesetzt werden, wenn sie während des Hochwassers aktiv sind. In diesem Fall reduzieren sie den stromabwärts gerichteten Sedimenttransport und verhindern so eine unkontrollierte Sedimentation in der Nähe von Siedlungsgebieten. Diese Geschiebefallen müssen in regelmäßigen Abständen ausgebaggert werden, um ihre Funktionsfähigkeit zu gewährleisten und können als Bindeglied zwischen Flussbau und Erhaltungsbaggerungen bezeichnet werden (Platina-2, 2016). Ziel sollte es generell sein das Geschiebe nicht dauerhaft dem Fluss zu entziehen, Geschiebefänge sind daher in Kombination mit der Kieszugabe auch eine praktikable Option, um Sedimente für eine kontrollierte Geschiebepflichtung zu gewinnen und im Flusssystem zu halten. Sie können entweder im Hauptstrom oder in einem Bypass- oder Nebenarm positioniert werden. Ihre Platzierung außerhalb des Hauptgerinnes hat den Hauptzweck, den Sedimenttransport bei Hochwässern zu steuern und den Transport in Unterliegerbereich und somit Anlandungen im Siedlungsraum zu reduzieren. Bei der Errichtung von Geschiebefallen sollten Größe und Ausdehnung auf Sedimenttransportdaten bzw. einem Sedimentbudget basieren, um so die erforderlichen Dimensionen möglichst gut abzuschätzen. Da das Auffangen von Sedimenten die stromabwärts gelegene Sedimentzufuhr beeinflusst, muss dieser Aspekt bei der Planung der Maßnahme berücksichtigt werden, um mögliche Eintiefungstendenzen der Flusssohle in Unterliegerstrecken nicht zu verstärken. Hinsichtlich der Tiefe des Geschiebefangs muss auch die Mächtigkeit der Kiesschicht berücksichtigt werden, damit diese nicht in feine tertiäre Sedimente oder Felsen einschneidet.



## 4 Grenzüberschreitende Betrachtung

Die Grenzüberschreitenden Betrachtungen entstammen den Publikationen Habersack et al. (2019a) und Habersack et al. (2019b) welche im Zuge des EU-Projektes DanubeSediment erstellt wurden.

Die sozioökonomische Entwicklung im Einzugsgebiet der Donau hat die Donau und ihre Nebenflüsse allmählich verändert und in weiterer Folge auch das Sedimentregime beeinflusst. Als Treibende Kräfte für diese Veränderungen wurde der Hochwasserschutz, Wasserkraft, Schifffahrt, Wasserversorgung, Landnutzung und Baggerungen identifiziert (DanubeSediment, 2018). Weitere Randbedingungen können sich z.B. aus der Ökologie und dem Klimawandel ergeben.

Diese treibenden Kräfte verursachen Belastungen, die das Sedimentregime stark beeinflussen, wie z.B. Querbauwerke, Flussregulierungs- und Erhaltungsarbeiten (Abbildung 95). Querbauwerke zur Wasserkraftnutzung und Wasserversorgung, wie Dämme und Wehre, unterbrechen die Sedimentdurchgängigkeit weitgehend. Uferverbauungen und abgetrennte Seitenarme sowie Hochwasserschutzdämme behindern zusätzlich den seitlichen Austausch von Sedimenten.

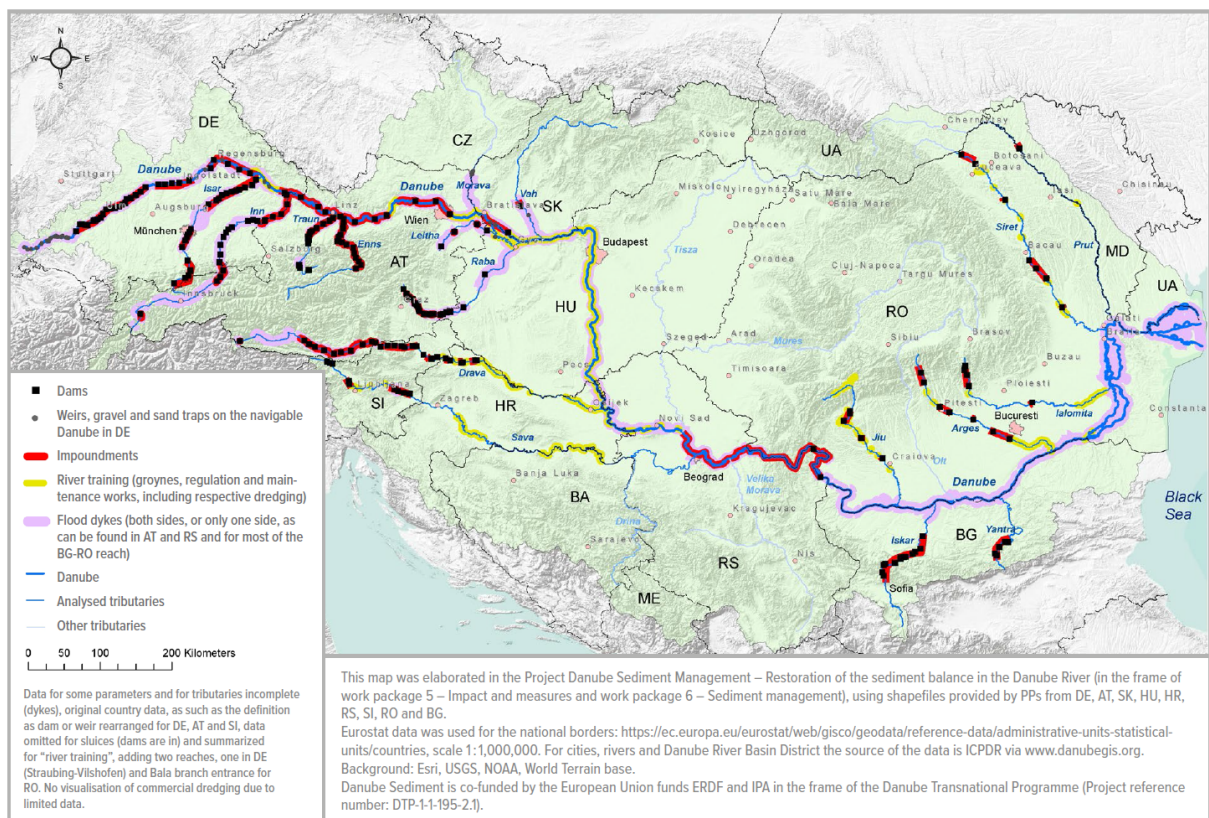
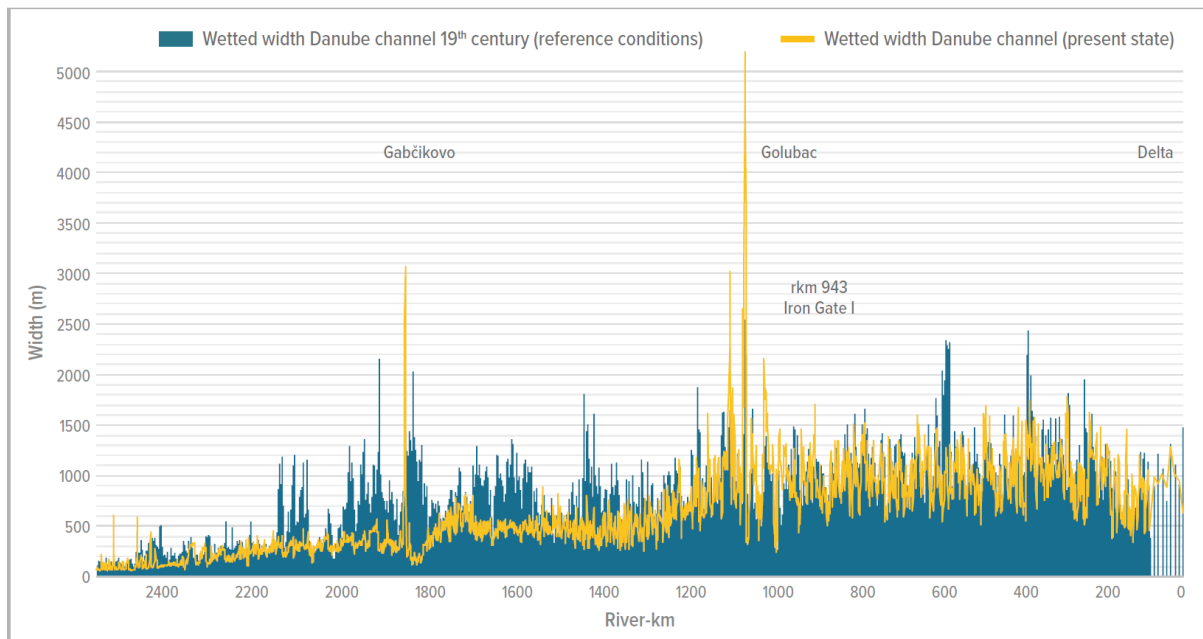


Abbildung 95. Belastungen im Zusammenhang mit dem Sedimentregime an der Donau und ausgewählten Nebenflüssen (basierend auf den Ergebnissen des DanubeSediment Berichts "Interactions of Key Drivers and Pressures on the Morphodynamics of the Danube") (Habersack et al., 2019a).

### 4.1 Flussmorphologische Veränderung

Als Folge der oben genannten Eingriffe wurde die Morphologie der Donau stark verändert. Historisch gesehen umfasste der Hauptflusstyp "multi-thread anabranching" 1685 Strom-km, von denen 390 Strom-km als „high-energy“ und 1295 Strom-km als „low-energy“ Typ klassifiziert waren. Derzeit sind in der Unteren Donau nur noch 745 Strom-km des Flusstyps "multi-thread anabranching"

(low energy) vorhanden, während der Flusstyp "multi-thread anabranching" (high energy) nicht mehr vorkommt. In der Oberen und Mittleren Donau wurden größere Abschnitte der ehemals komplexen Flussmorphologie mit mäandrierenden und gewundenen Flusstypen mit mehreren mehrarmigen, verzweigten Strecken im Zuge der Regulierung hin zu einem einarmigen gewundenen Flusstyp verändert. Die ehemaligen Flusssysteme mit komplexen Gerinnesystemen sind nun in die zwei klar unterscheidbaren Einheiten Fluss und Au unterteilt, wobei die Überflutungsflächen drastisch reduziert wurden. Im Vergleich zum 19. Jahrhundert ist nur noch ein Fünftel der Überflutungsflächen vorhanden (ICPDR, 2009). Besonders in der Oberen und der Mittlere Donau, die die Slowakisch-Ungarische-Grenzstrecke und südliche ungarische Abschnitte einschließt, wurde die Breite der Donau und ihre Überflutungsgebiete durch Uferverbauungen sowie durch Abtrennen von Seitenarmen und Vorländern drastisch reduziert. In der Oberen Donau, wurde die Gesamtbreite im Durchschnitt um 39% verringert (die aktive Breite um 22%) und an der mittleren Donau um 12% (die aktive Breite um 1%). Die Konstruktion von Regulierungsbauwerken wie Leitwerken und Buhnen verringerte zusätzlich die Breite bei niedrigem Wasserstand. Die Eingriffe an der Unteren Donau sind weniger ausgeprägt. Hier wurde die Breite durchschnittliche um 4% reduziert (Abbildung 96).



**Abbildung 96. Vergleich der Breitenveränderung an der Donau: 20. Jahrhundert und aktuelle Situation (basierend auf den Ergebnissen des DanubeSediment Berichts "Long-term Morphological Development of the Danube in Relation to the Sediment Balance"). Die großen Breitenzunahmen an gewissen Stellen sind im aktuellen Zustand auf Stauräume zurückzuführen (Habersack et al., 2019b).**

Zusätzlich zu den Veränderungen der Gewässerbreite wurde die Länge der Donau - hauptsächlich durch das Abtrennen von Mäandern - verkürzt. Die Flusslänge wurde an der Oberen Donau um etwa 100 Strom-km (-11%) verringert, an der Mittleren Donau um etwa 30 Strom-km (-4%) und um etwa 4 Strom-km (-1%) an der Unteren Donau (Abbildung 97).

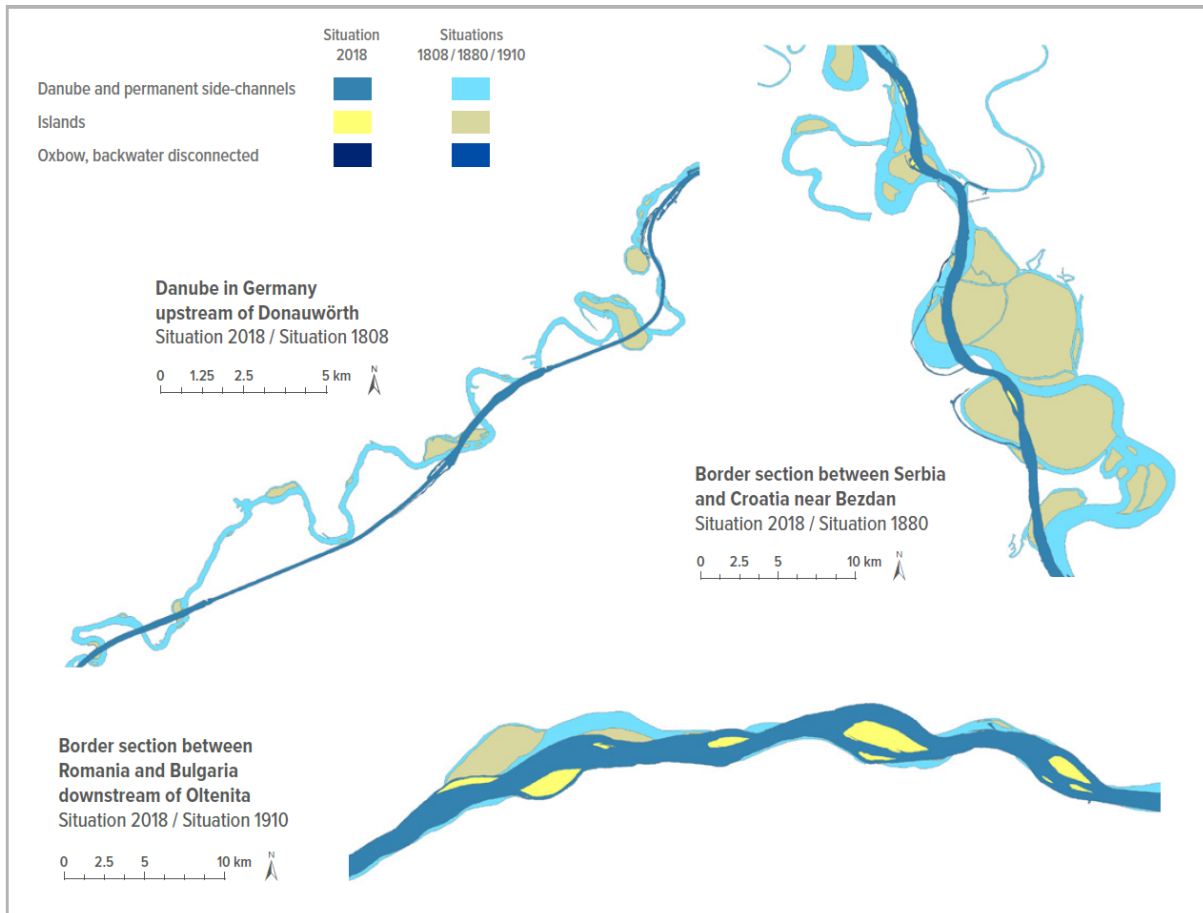


Abbildung 97. Oben links: Die Donau in Deutschland flussaufwärts von Donauwörth. Oben rechts: Grenzabschnitt zwischen Serbien und Kroatien bei Bezdán. Unten: Grenzabschnitt zwischen Rumänien und Bulgarien flussabwärts von Oltenita (basierend auf Daten erhoben für den DanubeSediment-Bericht " Long-term Morphological Development of the Danube in Relation to the Sediment Balance") (Habersack, et al., 2019b).

## 4.2 Sohlentwicklung

Durch die oben genannten Veränderungen hat sich das Sedimentregime im Donaueinzugsgebiet stark verändert: frei fließende Abschnitte sind aufgrund höherer Transportkapazitäten und mangelnder Sedimentdurchgängigkeit erosionsanfällig, während das reduzierte Energieliniengefälle in den Stauräumen zu einer Verlandung führt. Insgesamt sind rund 733 km (29%) der Donau von Erosion (56% bei Einbeziehung der Unteren Donau, siehe unten) und 857 km (34%) der Donau von Sedimentation geprägt. Entlang der 241 km (10%) der Donau herrscht ein dynamisches Gleichgewicht oder es treten keine signifikanten Veränderungen auf (Abbildung 98). Im ungarischen Abschnitt und flussabwärts des Kraftwerks Eisernes Tor II befinden sich Bereiche mit starker Erosion. Hohe Sedimentation tritt in den Stauräumen der Kraftwerke Aschach, Gabčíkovo und Eisernes Tor I auf. Für den Großteil der Unteren Donau (670 Strom-km, von Strom-km 750 bis 80) liegen nicht genügend Daten vor, um die Sohlentwicklung im Detail beurteilen zu können. Die Auswertung von Querprofilmessungen mit Zeitreihen von mehr als 25 Jahren, beginnend in den 1980er und 1990er Jahren, zeigt an elf von zwölf rumänischen Pegeln eine geringe Sohleintiefung (Trend). Einschließlich dieser Strecke weisen ca. 56% der Flusslänge mit Erosionstendenzen auf.

Die räumliche Auflösung der Querprofilmessungen an der Unteren Donau reicht nicht aus, um eine zuverlässige Aussage für die gesamte Strecke zu treffen. Die Analyse, die sich auf mehr als 300

Querprofile über zwei Zeitschritte (2008 und 2017) stützt, zeigt lokale Anlandungen in Relation zur gesamten Sohlabsenkung auf vielen Abschnitten der Unteren Donau. Dies ist jedoch eine Folge des Hochwassers im Jahr 2006, das zu einem niedrigen Flussbettspiegel als Ausgangspunkt führt, und kann nicht für weitere Analysen und Schlussfolgerungen herangezogen werden. Für die Zukunft sind detailliertere Messungen erforderlich. Weiters lassen zwei Zeitschritte keine Bestimmung von Erosions- oder Ablagerungstrends zu.

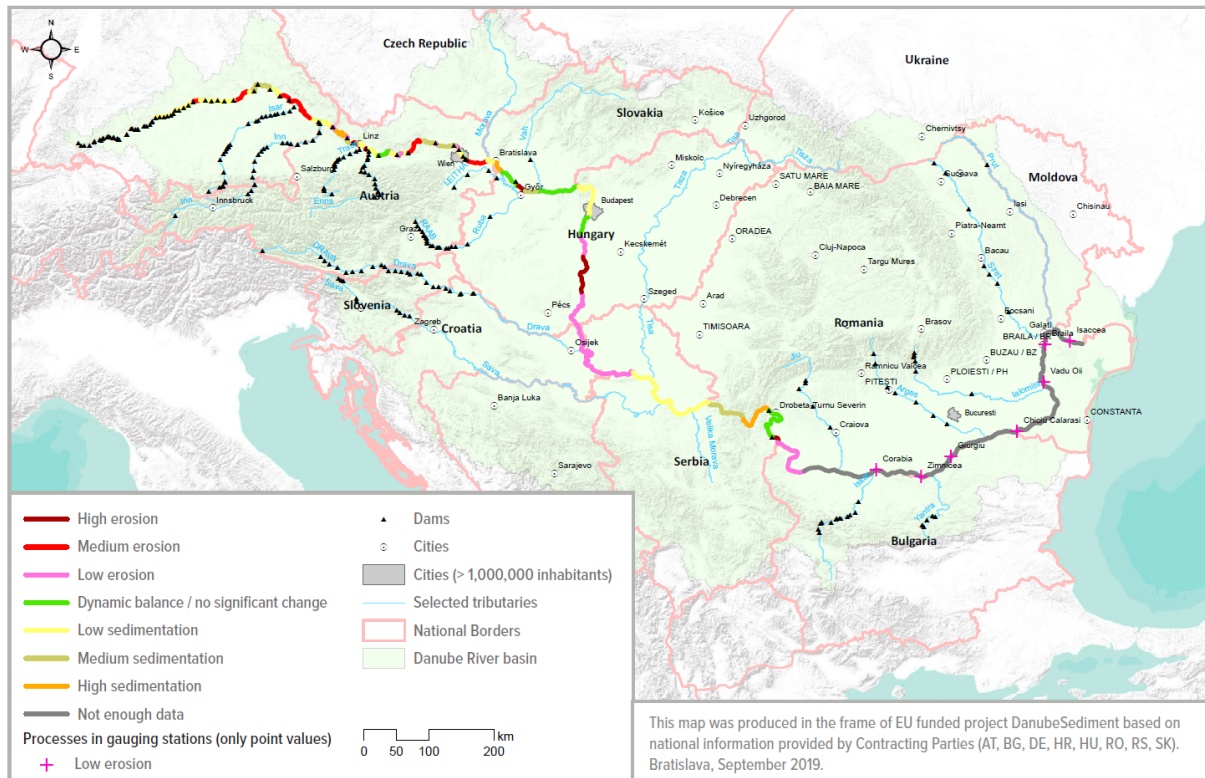


Abbildung 98. Strecken an der Oberen, Mittleren und Unteren Donau mit Erosion und Anlandung (basierend auf den Ergebnissen des DanubeSediment Berichts "Assessment of the Sediment Balance of the Danube") (Habersack et al., 2019a).

## 4.3 Feststofftransport

### 4.3.1 Schwebstofftransport

Der Schwebstofftransport der Donau wurde für zwei verschiedene Zeiträume ausgewertet. Der Ist-Zustand wurde auf der Basis des Zeitraums 1986-2016 ermittelt. Der Zeitraum vor Kraftwerksbau wurde anhand verschiedener Zeiträume abhängig von der Inbetriebnahme der nahegelegenen Wasserkraftwerke analysiert. Zusätzlich wurde an einigen wichtigen Zubringern der Schwebstofftransport an den letzten Stationen vor Einmündung in die Donau berücksichtigt. Die Monitoringdaten wurden im Projekt DanubeSediment erhoben und zusätzlich wurden Sedimentdaten aus der Studie der UNESCO (1993) an Stationen verwendet, für die im Projekt keine Daten zur Verfügung gestellt wurden.

Für den Zeitraum 1986-2016 bleibt die mittlere jährliche Schwebstofffracht im deutschen Donauabschnitt Großteils unter 1 Mio. t/a. Die Einmündung der Isar bringt keinen großen Zuwachs der Schwebstofffracht, jedoch transportiert der Inn eine große Menge an Schwebstoffen, was zu einem Anstieg der mittleren jährlichen Schwebstofffracht in der Donau bis zu rund 5 Mio. t/a führt. Entlang der österreichischen Strecke sind lokal kleinere Veränderungen innerhalb von 1 Mio. t/a zu

beobachten, die sich durch den Einfluss der Feinsedimentablagerung und Remobilisierung in den Stauräumen der Kraftwerke, insbesondere aus dem Kraftwerk Aschach während der Hochwasser 2002 und 2013, den Nebenflüssen Traun und Enns und einer gewissen Streuung in den Schwebstoffwerten erklären lassen. Die Stauräume der slowakischen Kraftwerke scheinen dagegen eine deutliche Rückhaltfunktion zu haben, wobei ein lokaler Rückgang der mittleren jährlichen Schwebstofffracht von 3,5 Mio. t/a flussaufwärts auf 1,3 Mio. t/a flussabwärts der Kraftwerke beobachtet werden kann. Entlang des ungarischen Abschnitts ist ein leichter Anstieg durch den Zufluss der Raab zu verzeichnen, jedoch ist die Schwebstofffracht aufgrund der eher kleinen Zuflüsse entlang dieses Abschnitts recht konstant. Von der ungarisch-kroatischen Grenze aus ist ein kontinuierlicher Anstieg der mittleren jährlichen Schwebstofffracht von 1,6 Mio. t/a auf 13,7 Mio. t/a bis zur Stauwurzel des Kraftwerks Eisernes Tor I zu beobachten. Dies ist auf die Einmündung der großen Zubringer Drau (0,3 Mio. t/a), Theiß (2,6 Mio. t/a), Sava (2,9 Mio. t/a) und Große Morava (2,1 Mio. t/a) zurückzuführen. Beim Kraftwerk Eisernes Tor I ist eine deutliche Abnahme der mittleren jährlichen Schwebstofffracht zu verzeichnen, wobei die Reduktion auf eine mittlere Jahresfracht von 2,5 Mio. t stromabwärts des Stauraums auf einen Rückhalt von bis zu 80% hinweist. Flussabwärts des Eisernen Tor I und II ist ein deutlicher Anstieg der mittleren jährlichen Schwebstofffracht von 2,5 Mio. t/a auf 13,5 Mio. t/a bis zur Einmündung der Jantra zu verzeichnen. Dieser Anstieg lässt sich teilweise durch den Beitrag der Zubringer erklären (z.B. Jiu 3 Mio. t/a). Zusätzlich ist die Verfügbarkeit von Sedimenten aufgrund des Rückhalts bei Querbauwerken begrenzt und im Vergleich zur Sedimenttransportkapazität des Flusses eher gering. Es folgt ein recht stabiler Abschnitt mit nur geringer Zunahme der Schwebstofffracht zwischen Zimnicea und Chiciu Calarasi, mit Jahresmittelwerten von 13 Mio. t/a bis 14,6 Mio. t/a. Die mittlere jährliche Schwebstofffracht zwischen Chiciu Calarasi und Vadu Oii sinkt von 14,6 Mio. t/a auf 10,7 Mio. t/a. Von Vadu Oii bis zum Einlaufbereich des Donaudeltas (Isaccea) ist wieder ein kontinuierlicher Anstieg der mittleren jährlichen Schwebstofffracht von 10,7 auf 21,4 Mio. t/a zu beobachten. Die Flüsse Siret und Prut tragen mit 4 Mio. t/a dazu bei.

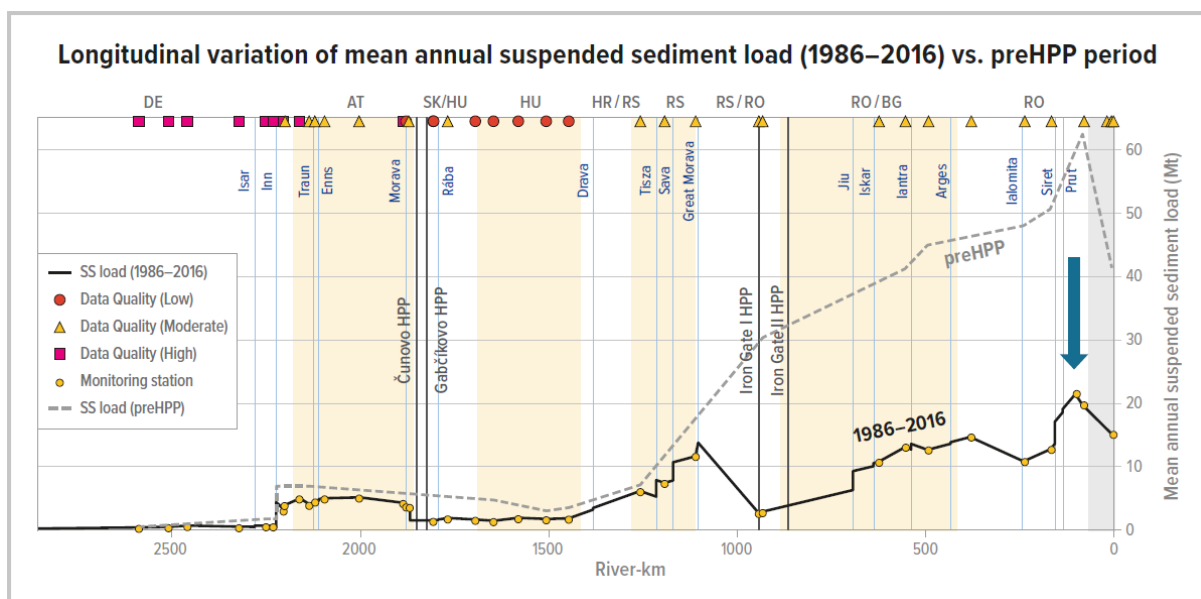


Abbildung 99. Änderung des mittleren jährlichen Schwebstofftransports entlang der Donau: Vergangenheit und Gegenwart. Der Pfeil zeigt eine Verringerung des Schwebstoffeintrags in das Donaudelta und das Schwarze Meer um etwa 60 % an. Der Datenqualitätsindikator bezieht sich nur auf die gegenwärtige Situation: data quality (high): gute Praktiken der Schwebstoffüberwachung, data quality (moderate): weniger genaue Datensätze und Verbesserungen werden

vorgeschlagen, data quality (low): erhebliche Verbesserungen sind erforderlich (Abbildung und Einzelheiten zur Datenqualität siehe DanubeSediment, 2019) (Habersack et al., 2019a).

Vergleicht man diese Daten mit den Zeiträumen vor dem Bau der Kraftwerke, so ist an allen Stationen, an denen beide Datensätze verfügbar waren, ein Rückgang der mittleren jährlichen Schwebstofffracht zu beobachten. Die Reduktion liegt zwischen ca. 15% (in Serbien an der Messstelle Novi Sad) und ca. 70% (an der Messstelle Budapest flussabwärts des Kraftwerkes Cunovo und Gabčíkovo und den Messstellen in den Abschnitten flussabwärts der Kraftwerke Eisernes Tor I und II). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der gesamte Schwebstoffeintrag in das Donaudelta und das Schwarze Meer um mehr als 60% von historisch ca. 60 und 40 Mio. t/a auf ca. 20 bzw. 15 Mio. Tonnen pro Jahr zurückgegangen ist (gemessen an der Messstation Ceatal Izmail für den Eintrag in das Donaudelta für die Jahre 1931-1972 und 1986-2016; der Eintrag in das Schwarze Meer wurde für die Stationen Periprava, Sfantul Gheorghe Harbour und Sulina für die Jahre 1986-2016 gemessen und aufsummiert und aus den Stationen Periprava (gemessen), Sfantul Gheorghe Harbour und Sulina (rückgerechnet) für die Jahre 1961-1972 ermittelt). Von Ceatal Izmail bis zum Schwarzen Meer nimmt die Schwebstofffracht ab, wobei an den untersten Messstationen Unsicherheiten durch den Tideeinfluss aus dem Schwarzen Meer bestehen. Wichtig ist, dass nicht nur die Wasserkraftwerke an der Donau für die Abnahme der Schwebstofffracht verantwortlich sind, sondern auch die Abnahme des Schwebstoffeintrags aus den Nebenflüssen, insbesondere in der Mittleren und Unteren Donau, zu einer Verringerung des Schwebstofftransports in der Donau führt. Die Ergebnisse des Projekts DanubeSediment zeigen, dass die Reduktion für Nebenflüsse mit ausreichender Datenlage für beide Zeiträume zwischen 20% und 70% liegt.

#### 4.3.2 Geschiebetransport

Der Geschiebetransport wurde ebenfalls für verschiedene Zeiträume ausgewertet, jedoch ist der Datensatz deutlich geringer als der Datensatz für die Schwebstoffe (Abbildung 100). Entlang der österreichischen Donau lag der mittlere jährliche Geschiebetransport aus direkten Messungen in Wien (Ehrenberger, 1931) bzw. östlich von Wien (Bundestrombauamt 1956/1957) für die Zeit nach der Regulierung, aber vor dem Bau der österreichischen Donaukraftwerke, bei etwa 0,6 Mio m<sup>3</sup>/a bzw. 1,05 Mio. t/a. Nach dem Bau des letzten Wasserkraftwerkes an der österreichischen Donau sank dieser Wert deutlich auf rund 0,38 Mio. t/a (Mittlere Fracht 2009 - 2018) gemessen östlich von Wien, bei Strom-km 1886,24. Das Geschiebe in der freien Fließstrecke östlich von Wien stammt aus der erodierenden Sohle und der Kieszugabe unterhalb des Kraftwerks Freudenu durch die VHP, sowie in jüngerer Zeit auch aus dem Sediment welches im Zuge des Geschiebemanagements der viadonau zu Berg verführt wird. Die Zahl von 0,38 Mio. t/a stimmt mit dem mittleren jährlichen Geschiebetransport von 0,40 Mt/a, gemessen in Devín (Slowakei, Strom-km 1875,15), gut überein. Flussabwärts der slowakischen Kraftwerke wurde eine deutliche Zunahme des Geschiebetransports im Vergleich zum Zeitraum vor der Inbetriebnahme der Wasserkraftwerke festgestellt. So lag der mittlere jährliche Geschiebetransport bei Strom-km 1825,6 im Zeitraum 1940-1960 bei etwa 0,19 Mio. t/a und stieg auf etwa 0,55 Mio. t/a (in Klizska Nema, Strom-km 1795,58). Diese zeitliche Veränderung deutet auf eine lokal gestiegene Transportkapazität bzw. Sedimentverfügbarkeit auf Grund von Erosion der Donau flussab des Kraftwerks Gabčíkovo hin. Tatsächlich wurde in den Jahren nach Inbetriebnahme des Kraftwerks Gabčíkovo eine signifikante Sohlenerosion entlang des slowakisch-ungarischen Donauabschnitts beobachtet (siehe z.B. Török und Baranya, 2017). Bedingt durch das Sedimentdefizit tiefte die Sohle stromab des Zusammenflusses der Alten Donau und des Unterwasserkanals des Kraftwerks Gabčíkovo bei Sap (Strom-km 1810) stark ein. Die Sohleintiefung

lag in diesem Bereich bei rund 5 m (1992-2002) bzw. bei rund 2 m (2002-2013), mit abnehmender Eintiefungstendenz im jüngeren Zeitraum. Das Talweggefälle reduzierte sich auf Grund der Eintiefung zwischen Strom-km 1810 und 1790 in den Jahren 1992/93 bis 2013 von rund 0.3 ‰ auf 0.13 ‰. Auf Grund dieses hohen Sedimentaustrags sind auch die Geschiebefrachten in diesem Bereich im jüngeren Zeitraum höher. Stromab davon sind im Gegenzug Anlandungen auf Grund des Sedimenteintrags von stromauf und des geringeren Gefälles zu beobachten. Die niedrigen Transportwerte der Jahre 1940-1960 im Bereich der slowakisch-ungarischen bzw. der ungarischen Donau ist auf den Gefälleknick der Donau bei Strom-km 1790 (Gönyű – Bereich Zubringer Raab) zurückzuführen. Hier reduzierte sich das Gefälle von zirka 0.35 ‰ auf 0.05 ‰ und die Geschiebetransportkapazität nimmt dementsprechend ab. Der Übergang von einem Kies- zu einem Sandbettfluss findet in der ungarischen Donau statt und der Sandanteil des gemessenen Geschiebes beträgt rund 80% bei Dunaföldvár (Strom-km 1555,3). Basierend auf dem mittleren jährlichen Geschiebetransport zeigen die für die rumänischen Stationen geschätzten Werte niedrige Werte am Stauraum Eisernes Tor, die zwischen 0,02 - 0,1 Mio. t/a liegen. Unmittelbar stromabwärts der Kraftwerke Eisernes Tor I und II ist ein Anstieg bis etwa 0,5 Mio. t/a zu beobachten, der durch Erosion stromab des Stauraums erklärt werden kann. Beim transportierten Geschiebe in diesem Abschnitt der Donau handelt es sich um Sandfraktionen, mit einem  $D_{50}$  von zirka 0,3 mm (Mittelsand).

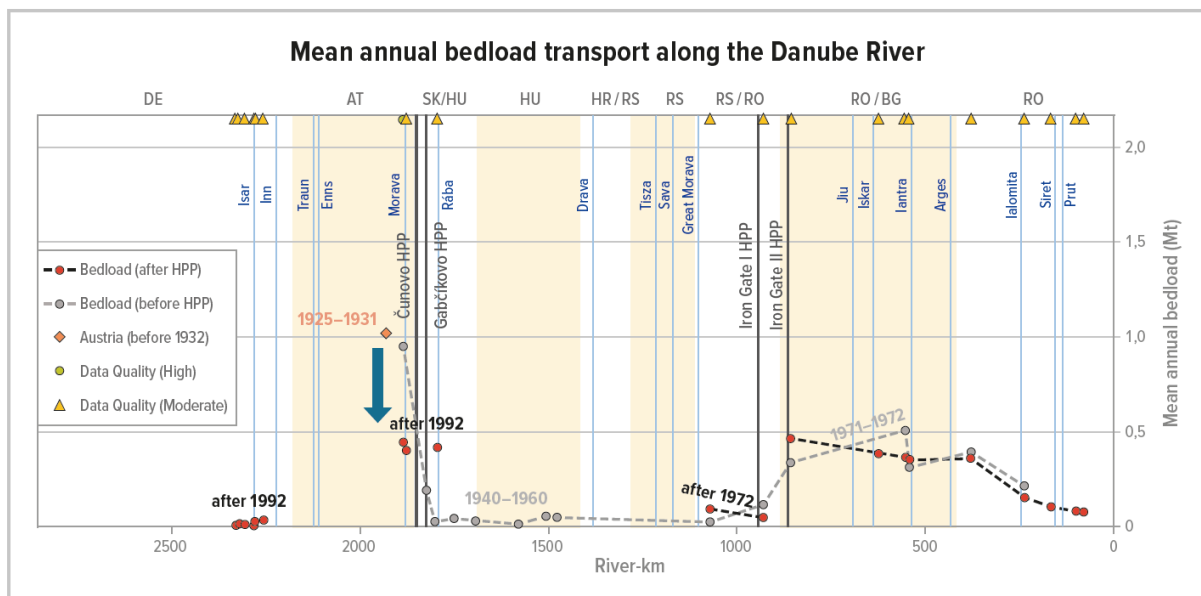


Abbildung 100. Änderung des mittleren jährlichen Geschiebetransports entlang der Donau: in der Vergangenheit und in der Gegenwart. Der Pfeil zeigt eine Reduktion des Geschiebetransports in der österreichischen Donau östlich von Wien um etwa 50% an. Der Datenqualitätsindikator bezieht sich nur auf die gegenwärtige Situation: hohe Datenqualität: gute Praktiken des Geschiebemonitorings, mäßige Datenqualität: weniger genaue Datensätze und Verbesserungen werden empfohlen. (aus dem DanubeSediment Projektbericht "Sediment data analysis in the Danube River") (Habersack et al., 2019a)

#### 4.4 Baggerungen und Materialzugaben

In der Vergangenheit wurden Baggerarbeiten in der Donau beispielsweise für kommerzielle Zwecke, Schifffahrt, Hochwasserschutz, Flussausregulierung, Straßenbau, Landgewinnung und beim Bau von Wasserkraftwerken durchgeführt. Gegenwärtig finden Baggerungen hauptsächlich für die Schifffahrt und den Hochwasserschutz sowie in einigen Fällen zur Entleerung von Stauräumen und für Renaturierungsprojekte statt. Darüber hinaus werden Baggerarbeiten an der Mündung von Zubringern, in aufgestauten Flussabschnitten sowie in Häfen und Hafeneinfahrten durchgeführt. In

den Abschnitten der Oberen (Deutschland und Österreich) und Mittleren (Ungarn) Donau werden kommerzielle Gewinnungsbaggerungen (von Kies) nicht mehr durchgeführt bzw. erlaubt. In diesen Donauabschnitten wird das Baggergut im Hauptstrom verklappt und damit für den Sedimenttransport verfügbar gemacht. Alternativ wird das Material für den Bau von Kiesstrukturen wie z.B. Kiesbänken oder -inseln verwendet. In Österreich wird das Material stromaufwärts der Baggerstelle wieder verklappt. Seit 2015 hat der Transport nach flussauf deutlich zugenommen. Auch in anderen Teilen der Donau ändert sich die Situation in Richtung nachhaltigere Baggerstrategien.

Im Rahmen des Projekts DanubeSediment wurden Baggerdaten in der Donau für drei verschiedene Zeiträume erhoben: 1920-1970, 1971-1990 und 1991-2016. Innerhalb des ersten Zeitraums decken nur die Daten in Deutschland und Österreich längere Zeiträume von über 10 Jahren ab, während die Daten aus anderen Ländern nur für wenige Jahre verfügbar sind. Für Kroatien umfassen die Baggerdaten nur drei Jahre, die in der dritten Periode dokumentiert wurden. Die Baggermengen waren im Zeitraum 1971-1990 am höchsten, wobei die größte Menge in der Mittleren Donau entnommen wurde (Abbildung 101 links). In diesem Zeitraum waren die Baggermengen höher als in der Oberen und Unteren Donau zusammen. Die aktivsten Länder in Bezug auf Baggerarbeiten waren die Slowakei, Serbien und Rumänien (Abbildung 101 rechts). In einigen Flussabschnitten, z.B. in einigen Teilen der Slowakei, Ungarns und Serbiens, überstiegen die Baggerkubaturen sogar die Geschiebezufuhr von stromauf. Die entnommenen Sedimente bestehen hauptsächlich aus Geschiebe, das bereits durch Kontinuumsunterbrechungen im Fluss erheblich beeinflusst wird. Da davon auszugehen ist, dass nicht alle Baggermengen im Rahmen des Projekts DanubeSediment erfasst wurden, sind die absoluten Zahlen mit Unsicherheiten behaftet. Um offene Fragen zu den langfristigen Auswirkungen der Baggerarbeiten zu beantworten, bedarf es weiterer Untersuchungen und ein besseres Monitoring der Baggermengen.

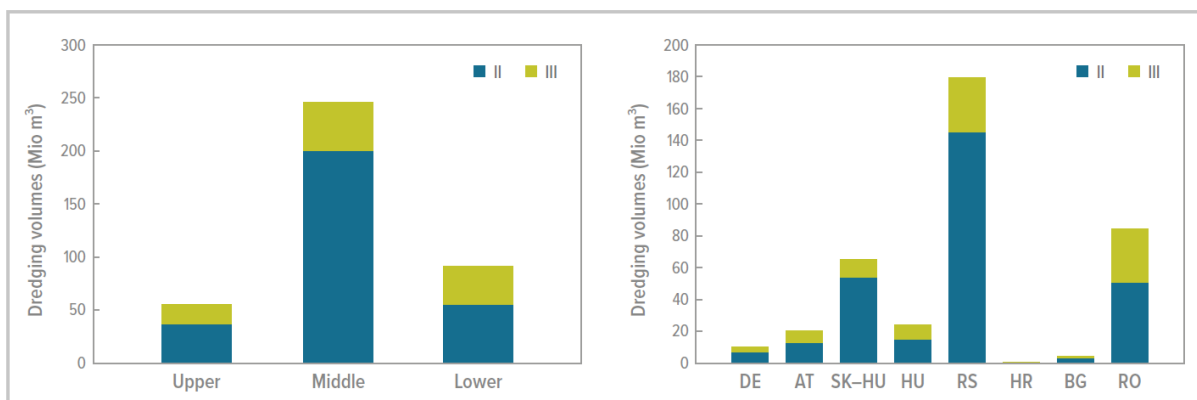


Abbildung 101. Baggerkubaturen unterteilt in Obere, Mittlere und Untere Donau (links) bzw. nach Ländern (rechts) für zwei verschiedene Zeitperioden (II: 1971-1990 und III: 1991-2016). Für Kroatien sind nur Baggerdaten für drei Jahre vorhanden.

In der Donau finden Kieszugaben nur in Österreich, stromab des Kraftwerks Freudenu, statt. Ziel der Zugaben ist es, das Kiesdefizit, welches aufgrund des Kraftwerks stromab davon existiert, zu kompensieren. Die Zugabemenge betrug zwischen 1996 und 2017 rund 186.000 m<sup>3</sup>/a. Diese Menge wurde kürzlich auf 235.000 m<sup>3</sup>/a erhöht (BMNT, 2018b), und von 2018 bis 2020 wurden im Mittel 244.000 m<sup>3</sup>/a zugegeben (DonauConsult, 2021).



#### 4.5 Korngrößen

Die Korngrößenzusammensetzung der Gewässersohle ist eine wichtige Information, die für die Modellierung des Geschiebetransports, die Abschätzung der Rauigkeit (erforderlich für die hydrodynamische Modellierung) oder die Beurteilung morphologischer Veränderungen des Flussbetts notwendig ist. Flüsse sind im Allgemeinen durch eine Abnahme des Gefälles und der Korngröße stromabwärts gekennzeichnet. Relevante Faktoren sind Abrasion, grössenselektiver Transport (d.h. unterschiedliche Mobilität von Fein- und Grobfraktionen), die Zunahme des Einzugsgebietes und des Abflusses, der Eintrag aus Zubringerflüssen und die Bildung von Deltas.

Die Obere und ein Teil der Mittleren Donau werden als Kiesbettfluss charakterisiert, wobei der Übergang von Kies zu Sand auf einer Länge von 240 km im ungarischen Teil der Donau (Strom-km 1660-1420) erfolgt. Weiter stromabwärts besteht das Flussbett hauptsächlich aus Sand, mit kurzen Abschnitten aus Kies, der von Zubringern geliefert wird (Abbildung 102).

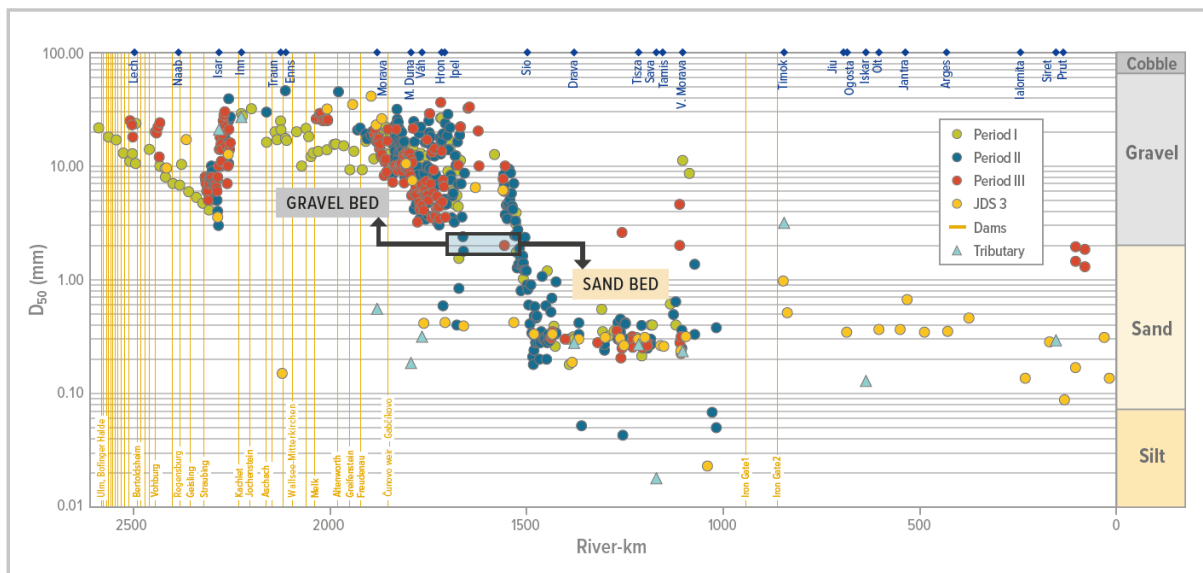


Abbildung 102. Änderung des mittleren Korndurchmessers  $D_{50}$  (Deckschicht) für drei Perioden (I: 1920-1970; II: 1971-1990; III: 1991-2016) entlang der Donau zwischen Strom-km 2600-1000 (aus dem DanubeSediment Projektbericht “Long-term Morphological Development of the Danube in Relation to the Sediment Balance”) (Habersack et al., 2019a)

Die Unterbrechung des Sedimentkontinuums an der Oberen Donau durch Kraftwerke hat einen starken Einfluss auf die Korngrößen der Gewässersohle. In den freien Fließstrecken und auch in den Abschnitten unmittelbar stromab von Kraftwerken besteht das Flussbett aus Kies, der sich durch den zunehmenden Rückstau einfluss des nächsten Kraftwerks hauptsächlich in (feinen) Sand und Schluff umwandelt (Abbildung 103). In Deutschland ist eine Zunahme der Korngrößen stromabwärts des Zusammenflusses mit den Zubringern Lech, Isar und Inn zu beobachten. Erhebungen von Korngrößen über längere Donauabschnitte sind im Österreichischen Abschnitt, kaum vorhanden, hier besteht der Datensatz im Wesentlichen aus drei Aufnahmen. Wobei die Älteste aus den 1920/1930er Jahren (dokumentiert in HZB, 1937) zwar die gesamte Österreichische Donau umfasst, jedoch vergleichsweise wenige Proben enthält, welche nicht direkt im Hauptstrom sondern laut Rosenauer (1947) auf Schotterbänken bei Niederwasser entnommen wurden. Die zwei jüngeren Aufnahmen in den zwei österreichischen freien Fließstrecken in der Wachau (1999) und Östlich von Wien (1987) wurden hingegen im Hauptstrom entnommen. Für einen Vergleich zwischen den 1920/30er (HZB, 1937) und den Aufnahmen von 1999 in der Wachau (Schmautz und Strobl, 2000), sowie Östlich von

Wien (Zottl und Erber, 1987) liegen nur je drei Vergleichsproben vor. Das Bild in der Wachau ist nicht ganz einheitlich, da bei Gegenüberstellung der Proben aus den 1920/1930er und von 1999, sowohl vergleichbare  $D_{50}$  und  $D_{90}$  Werte vorzufinden sind, als auch Proben bei denen  $D_{50}$  und  $D_{90}$  im Jahr 1999 gröber sind. Östlich von Wien liegen  $D_{50}$  und  $D_{90}$  an zwei Stellen unter den Werten von 1987 und eine Probe im Bereich der Werte von 1987. Der Vergleichsdatensatz ist denkbar klein, in Summe ist jedoch davon auszugehen, dass sich infolge des unterbundenen Geschiebezustroms nach Errichtung der Donaukraftwerke, die Sieblinien vergrößert haben (siehe auch 3.1.3).

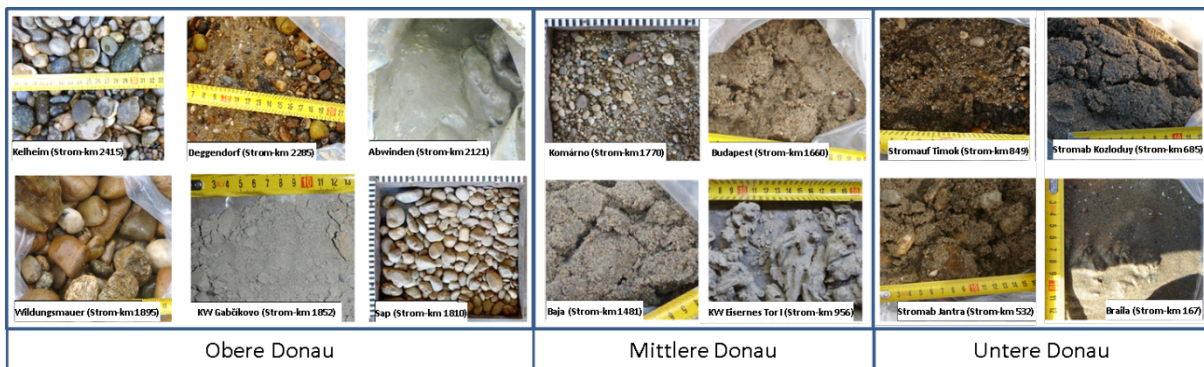


Abbildung 103. Sedimentproben aus der Oberen, Mittleren und Unteren Donau im Zeitraum 1991-2016 (aus dem DanubeSediment Projektbericht "Long-term Morphological Development of the Danube in Relation to the Sediment Balance").

Auch im Stauraum des Kraftwerks Gabčíkovo dominieren Feinsedimente, während stromab davon das Flussbett der Donau überwiegend aus grobem und feinem Kies besteht. Im Abschnitt stromab der Einmündung des Unterwasserkanals des Kraftwerks Gabčíkovo bei Sap (Strom-km 1810) ist eine geringfügige Verfeinerung der Sohle zu sehen. Eine Ursache ist die Verringerung des Sohlgefälles infolge der Sohleintiefung von rund 0.3 ‰ auf 0.13 ‰ in den Jahren von 1992/93 bis 2013. Eine größere Verfeinerung der Sohle ist am Beginn der Mittleren Donau (Strom-km 1790 bis 1765) zu beobachten. Hier kam es zu einer Reduktion des  $D_{50}$  von zirka 12 mm auf 6 mm. Die Hauptursachen sind wahrscheinlich Baggerungen, welche die gröbere Deckschicht aufgebrochen haben, und der fehlende Eintrag von gröberem Sediment infolge des Baus der stromaufliegenden Kraftwerke. Die Korngrößen nehmen allmählich bis Strom-km 1660 ab. Hier geht die Donau von einem Kies- zu einem Sandbettfluss über und die Korngrößen der Stromsohle wechseln von Feinkies zu Grobsand. In diesem Abschnitt (Strom-km 1765 bis 1660) ist im Vergleich zu früher zwar eine Verfeinerung der Sohle zu beobachten, jedoch in geringerem Ausmaß wie im stromaufliegenden Bereich. Im restlichen Verlauf der mittleren Donau bis zum Zusammenfluss mit der Großen Morava besteht das Flussbett hauptsächlich aus feinem und grobem Sand. Beim Mündungsbereich der Großen Morava liegen wiederum Kiesfraktion vor. Im Staubereich des Eisernen Tores I nehmen die Korngrößen ab und gehen in Sand, Schluff und Ton über (Abbildung 103).

Die Sedimente in der Unteren Donau bestehen hauptsächlich aus Grob- und Feinsand (Strom-km 862,8-100). Größere Korngrößen (Kies und Grobsand) kommen im Abschnitt unterhalb des Eisernen Tores II vor. Kiesbettzubringer (Timok, Jantra, Iskar) bewirkten eine natürliche Vergrößerung des Sandbettes der Unteren Donau in den Mündungsbereichen der Zubringer (lokaler Effekt). Dieser Effekt wird derzeit durch das Aufstauen der Zubringer erheblich reduziert. In den letzten 300 km werden die Korngrößen allmählich feiner, wobei Feinsand und Schluff den größten Teil des Flussbettes ausmachen (Abbildung 103). Diese natürliche stromabwärts gerichtete Verfeinerung der Sedimente

des Donaubetts weist auf natürlichere Bedingungen im Vergleich zur Oberen und Mittleren Donau hin.

## 4.6 Sedimentbilanz

Basierend auf den erhobenen Schwebstoffdaten, die im Bericht "Analysis of Sediment Data Collected along the Danube" (DanubeSediment, 2019) zusammengefasst wurden, wurde eine Bilanz der Schwebstofffrachten für die Donau und die wichtigsten Nebenflüsse erstellt. Diese Bilanz zeigt die gegenwärtige Situation und vergleicht diese mit der historischen Situation vor dem Bau der Wasserkraftwerke an der Donau (Abbildung 104). Unter den Nebenflüssen für die historische Daten verfügbar sind, hatte der Siret in der Unteren Donau den größten Beitrag zum Schwebstofftransport der Donau. Seine mittlere Jahresfracht betrug etwa 12 Mio. t (1965-1985, UNESCO, 1993). Andere wichtige Nebenflüsse in Bezug auf die mittlere Jahresfrachten an Schwebstoffen waren der Inn (etwa 5 Mio. t) für die Obere Donau, die Theiß (etwa 5 Mio. t, 1956-1985), die Sava (etwa 5,5 Mio. t, 1956-1985) und die Große Morava (Velika Morava, etwa 6,9 Mio. t, 1956-1985) für die Mittlere Donau und der Olt (etwa 6,8 Mio. t, 1956-1985) für die Untere Donau (UNESCO, 1993). Ein weiterer wichtiger Zubringer für die Sedimentbilanz war die Drau. Die in Abbildung 104 links dargestellten Daten sind jedoch bereits von den ersten Kraftwerken beeinflusst. Für die neuere Zeitspanne von 1986-2016 sind die wichtigsten Zubringer in Bezug auf den Schwebstofftransport (mittlere Jahresfracht) der Inn (etwa 4,1 Mio. t) für die Obere Donau, die Sava (etwa 2,9 Mio. t) und die Theiß (etwa 2,6 Mio. t) für die Mittlere Donau und die rumänischen Nebenflüsse Jiu (ca. 3 Mio. t) und Siret (ca. 3,5 Mio. t) für die Untere Donau.

Der Vergleich der beiden Zeiträume macht deutlich, dass die Abnahme des Schwebstoffeintrags aus den Nebenflüssen, insbesondere in der Mittleren und Unteren Donau, zu einer Verringerung des Schwebstofftransports in der Donau selbst führt. Die Projektergebnisse zeigen, dass die Reduktion bei den Zubringern, für die in beiden Zeiträumen ausreichend Daten vorliegen, zwischen 20% und 70% liegt. Darüber hinaus haben die Kraftwerkskette an der Oberen Donau und insbesondere die großen Stauräume der Kraftwerke Gabčíkovo und Eisenes Tor I einen Einfluss auf das Schwebstoffgleichgewicht, da große Materialmengen in diesen Stauräumen zurückgehalten werden. All diese Kraftwerke tragen in unterschiedlichem Ausmaß zum gesamten Sedimentdefizit in der Donau bei, wobei zu beachten ist, dass der Eintrag in die Stauräume im Vergleich zum historischen Zustand bereits reduziert ist, da auch in anderen Stauräumen stromaufwärts oder an den Zubringern Material zurückgehalten wird. Seit Kraftwerkserrichtung wurden rund 60% des Sedimenteintrags im Stauraum des Kraftwerks Gabčíkovo und 60-80% im Stauraum des Kraftwerks Eisernes Tor I zurückgehalten, wobei der Rückhalt zu Beginn der Periode am stärksten war und der Rückhalt heute geringer ist. Diese Daten werden durch einen Vergleich der Messstationen stromauf und stromab der Stauräume berechnet, wie im Bericht "Analysis of Sediment Data Collected along the Danube" (DanubeSediment, 2019) beschrieben. Basierend auch auf den Auswertungen der Sohlgrundaufnahmen beträgt die Verlandungsrate des Kraftwerks Eisernes Tor I seit Befüllung des Stauraums 10 bis 17% (Sedimentationsvolumen im Vergleich zum ursprünglichen Stauraumvolumen).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der gesamte Schwebstoffeintrag in das Donaudelta und das Schwarze Meer um mehr als 60% zurückgegangen ist, von ehemals ca. 60 und 40 Mio. t/a auf derzeit ca. 20 und 15 Mio. t/a (Details siehe Kapitel 4.3.1). Wie aus Abbildung 100 ersichtlich, nimmt die Schwebstofffracht von Ceatal Izmail bis zum Schwarzen Meer ab. Allerdings bestehen an den letzten

Messstationen aufgrund des Gezeiteneinflusses aus dem Schwarzen Meer bereits Unsicherheiten bei den ermittelten Schwebstofffrachten.

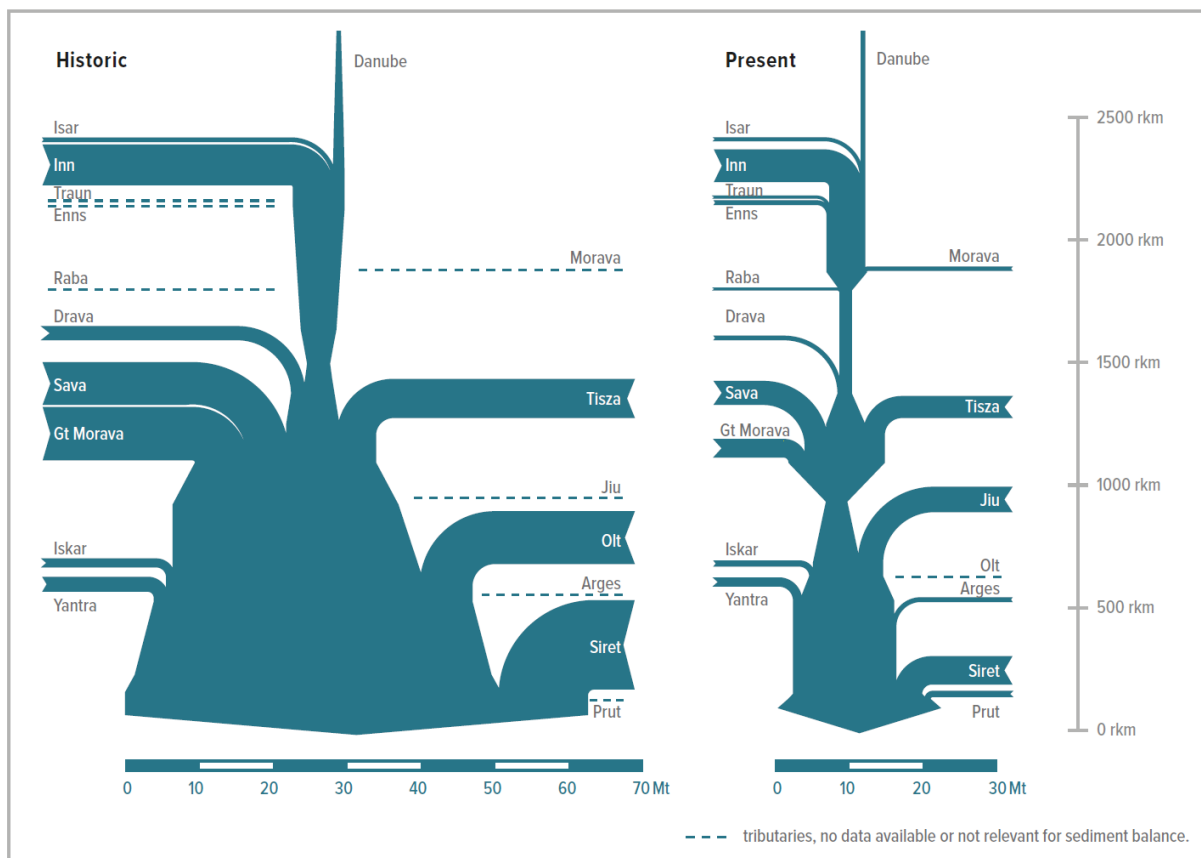


Abbildung 104. Schwebstoffbilanz an der Donau und wichtigen Zubringern vor (links) und nach (rechts) Kraftwerkerrichtung an der Donau (strichlierte Linien: Zubringer an denen keine Sedimentdaten vorhanden sind bzw. die nicht mehr relevant sind für die Sedimentbilanz) (Habersack et al., 2019b).

Die Datenbasis ist derzeit zu unvollständig, um eine Sedimentbilanz für die gesamte Donau erstellen zu können. Dafür wären die Einrichtung eines harmonisierten transnationalen Sedimentmessnetzes und die Einrichtung neuer Messstationen notwendig. So ein vereinheitlichtes Sedimentmonitoring sollte Schwebstoffe, Geschiebe, Sohlgrundaufnahmen, Korngrößen des Sohlmaterials, Baggerungs- und Zugabemengen und Vorlandverlandungen enthalten (Habersack et al., 2019b).

Dennoch zeigen die oben genannten Zahlen, dass der Sedimenthaushalt gestört ist und unterstreichen den Handlungsbedarf. Ziel des Sedimentmanagements im Donaueinzugsgebiet sollte daher ein ausgewogenes Sedimentregime mit einem dynamischen Gleichgewicht zwischen Sedimentation und Erosion sein, das typspezifische natürliche Sohlformen und Sohlmaterial zur Verfügung stellt.

#### 4.7 Significant Water Management Issue

Belastungen, die auf die aquatische Umwelt einwirken und die die Erreichung der Umweltziele der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) am meisten gefährden, werden als "Significant Water Management Issues" (SWMIs) bezeichnet. Die Probleme können sich aus aktuellen anthropogenen Aktivitäten, historischen anthropogenen Aktivitäten und neuen Entwicklungen ergeben.

Im ersten Danube River Basin Management Plan (DRBMP) 2009 und seiner Aktualisierung 2015 wurden Schlussfolgerungen zum Sedimentmanagement im Einzugsgebiet der Donau skizziert, einschließlich entsprechender Maßnahmen für die kommenden River Basin Management und Flood Risk Management-Zyklen. Die Sedimente wurden jedoch nicht als ein wesentliches Problem des Wassermanagements behandelt.

Basierend auf den Ergebnissen des Projekts DanubeSediment wurde die Veränderung des Sedimentregimes als ein wesentliches Problem der Wasserwirtschaft (Significant Water Management Issue) eingestuft. Gemäß dem Beschluss der Delegationsleiter der ICPDR wurde die Veränderung des Sedimentgleichgewichts als neuer Unterpunkt unter dem bestehenden SWMI "Hydromorphologische Veränderungen" im 3. Donau-Flussgebietsmanagementplan 2021 identifiziert. Der zugehörige Text ist in Abbildung 105 dargestellt. Zusätzlich sollen die Sedimente bzw. das Sedimentmanagement ein integraler Bestandteil der nationalen Flussgebiets- und Hochwasserrisikomanagementpläne sein.

## Sediment balance alteration

The aspect of sediment quantity in the Danube River Basin was already mentioned in the 1<sup>st</sup> DRBMP 2009 and considered as potential Significant Water Management Issue in 2013. Based on key findings of the DanubeSediment project (Danube Sediment Management – Restoration of the Sediment Balance in the Danube River) the alteration of the sediment balance is now identified as new sub-item of the Significant Water

Management Issue “Hydromorphological alterations”. First results of the project are used for the description of the issue and the preliminary identification of actions and coordination requirements for the basin-wide level. The results of the project will be further discussed under the umbrella of the ICPDR with the aim to fully integrate them into the development of the 3<sup>rd</sup> DRBMP Update 2021.

### THE ISSUE

The sediment balance is disturbed in particular by interruption of sediment transport caused by transversal structures (such as weirs or dams due to e.g. hydropower use, water supply or flood protection). The sediment balance is furthermore impacted by river regulation works for flood protection and navigation (river strengthening and building dykes often leading to cut-off meanders and shortening of the river length), as well as commercial dredging, land use (e.g. agriculture and urbanisation) on the entire catchment and other infrastructure projects. These measures reduce the river

width, increase the riverbed slope whereas bank protection measures prohibit side erosion. This leads to a sediment deficit and increased sediment transport capacity in the free-flowing sections as well as to coastal erosion. In impounded sections, floodplains and groin fields a surplus of sediments is dominating. Disturbed morphodynamics cause a deterioration of type-specific habitats and may cause a lowering of groundwater levels. In general this may lead to severe impacts on the type-specific aquatic communities and groundwater dependent terrestrial ecosystems and thus on the water status.<sup>1</sup>



The ICPDR's basin-wide vision is a balanced sediment regime and an undisturbed sediment continuity. Type-specific natural bed forms and bed material as well as a dynamic equilibrium between sedimentation and erosion are provided. The balanced sediment regime enables the long-term provision of appropriate habitats for the type-specific aquatic communities and groundwater dependent terrestrial ecosystems.

### PRELIMINARY IDENTIFICATION OF ACTIONS AND COORDINATION REQUIREMENTS FOR THE BASIN-WIDE LEVEL

- ▶ The objective of the EU funded DanubeSediment project (2017–2019) is to improve water and sediment management as well as the morphology of the Danube River. Following the DPSIR (Drivers, Pressures, States, Impacts and Responses) approach the key drivers and pressures in the Danube River Basin that act on the sediment regime were identified and their impacts were described.
- ▶ The DanubeSediment project identified a sediment imbalance for the Danube River, revealing areas with erosion and sedimentation being a risk for achieving the environmental objectives of the WFD.
- ▶ To gain deeper understanding of sediment quantity related problems, the establishment of a harmonized sediment quantity monitoring network will be discussed in the frame of the TransNational Monitoring Network (TNMN)<sup>2</sup> and under the supervision of the Hydromorphology Task Group (HYMO TG), Monitoring and Assessment Expert Group and Flood Protection Expert Group.
- ▶ The Danube Sediment Management Guidance will provide recommendations towards the 3<sup>rd</sup> DRBM Plan Update 2021 for an improved sediment balance.
- ▶ The Manual for Stakeholders will offer assistance for sediment related actions in the Danube River Basin and future programmes of measures.
- ▶ A catalogue of measures in order to mitigate the impacts is available to support targeting measures to improve the sediment balance and continuity; the catalogue will need to be updated in the future.

1 Article 1a Water Framework Directive.

2 <https://www.icpdr.org/main/activities-projects/tnmn-transnational-monitoring-network>.

Abbildung 105. Sediment balance alteration SWMI (aus Habersack et al., 2019b)

## 5 Zusammenfassung und Empfehlungen

Die Obere (österreichische) Donau wurde in der Vergangenheit über weite Strecken für den Hochwasserschutz und für die Schifffahrt stark reguliert. An der österreichischen Donau wurde die Gesamtbreite im Durchschnitt um 42% (die aktive Breite um 24%) verringert (DanubeSediment). Der Bau von Regulierungsmaßnahmen wie Leitwerken und Buhnen verringerte die Breite bei niedrigeren Wasserständen zusätzlich. Darüber hinaus sind rund 78% der Donau in Österreich von den Kraftwerken beeinflusst, während nur 22% (oder 77 Strom-km) frei fließende Abschnitte sind (NEWADA duo, 2014). In den letzten Jahren werden wieder mehreren Streckenabschnitten in einen natürlicheren Zustand versetzt. Dies war ein langer Lernprozess, der in der Oberen Donau über viele Jahrzehnte stattfand.

Als Folge der zahlreichen Eingriffe hat sich das Sedimentregime der Donau im letzten Jahrhundert stark verändert. In den Stauräumen der Kraftwerke kommt es aufgrund der verringerten Fließgeschwindigkeiten zu Ablagerung und folglich zu einem Überschuss an Sedimenten. Die verbleibenden freien Fließstrecken der Donau erfahren ein Sedimentdefizit durch die Unterbrechung des Sedimentkontinuums. Zusätzlich wurde durch die Reduktion der Gewässerbreite und durch die Erhöhung des Gefälles durch die Laufverkürzung die Sedimenttransportkapazität der Donau erhöht. Darüber hinaus wird durch die Kombination von eingeschränkter lateraler Erosion und Verzweigung der seitliche Sedimenteintrag begrenzt.

Durch langfristige Messungen von sedimentrelevanten Parametern können diese Veränderungen des Sedimentregimes aufgezeigt werden. Zu den an der österreichischen Donau erfassten Parametern gehören der Sedimenttransport (Schwebstoff und Geschiebe), Sohlhöhen- und Kubaturänderungen in den freien Fließstrecken und den Stauräumen, Erfassung von Bagger- und Zugabemengen. Zusätzlich wurden Kubaturen von Vorlandverlandung, die während der großer Hochwasserereignisse 2002 und 2013 auftraten, abgeschätzt.

Der Schwebstofftransport wird an der österreichischen Donau an mehreren Messstellen erhoben und teilweise reichen diese Aufzeichnungen mehrere Jahrzehnte zurück. Die ersten Messdaten liegen an der Messstelle Linz seit den 1920er Jahren vor. Für die Messstelle Linz ergibt sich für den Zeitraum von 1928 bis 1937 eine mittlere jährliche Schwebstofffracht von 6,7 Mio. t. Aus dieser Datenreihe ist erkennbar, dass der Schwebstofftransport ab den 1940er Jahren zurückging, was zeitlich mit der Errichtung der ersten Kraftwerke am Inn übereinstimmt und daher als wahrscheinliche Ursache gesehen werden kann. Die mittleren jährlichen Jahresfrachten an den Messstellen der österreichischen Donau (ab Messbeginn bzw. 1954-1998) betragen 3,0 +/- 0,4 Mio. t. Im Zeitraum 2001-2016 lagen die mittleren jährlichen Jahresfrachten mit 4,9 +/- 0,8 Mio. t deutlich höher. Dies ist auch durch die beiden großen Hochwasserereignisse in den Jahren 2002 und 2013 begründet, da bei Hochwasserereignissen große Mengen an Schwebstoffen transportiert werden können. Erste Messungen zum Geschiebetransport fanden in den 1930er Jahren (Ehrenberger 1930/1931 bei Wien) statt, jedoch werden erst seit dem Jahr 2006 kontinuierliche Messungen an der Messstelle Hainburg Straßenbrücke durchgeführt. Aufgrund dieser Daten lässt sich abschätzen, dass der Geschiebetransport im Vergleich zu den 1930er Jahren um mehr als 50% auf im Mittel 380.000 t/a (2009-2018) reduziert wurde. Während feinere Sedimente in den Stauräumen nur teilweise zurückgehalten werden, wird der Grobsedimenttransport häufig vollständig unterbrochen.

Durch Auswertung der Sohlgrundaufnahmen (viadonau und Verbund) konnte gezeigt werden, dass sich die Sohle in den beiden verbleibenden frei-fließenden Abschnitten eintieft. An der Donau östlich

von Wien wurde durch die Zugabe von Kies unterhalb des Kraftwerks Freudenu, das geänderte Baggermanagement (seit 2009 Verfuhr zu Berg) und die begonnenen Renaturierungsmaßnahmen (Maßnahmenkatalog Ost der viadonau) bereits begonnen dieser Entwicklung erfolgreich entgegenzuwirken.

Die Situation in den Stauräumen an der österreichischen Donau stellt sich sehr unterschiedlich dar. Während bei manchen Kraftwerken wie Aschach, Altenwörth, Greifenstein und Ottensheim-Wilhering (hier v.a. bei Extremereignissen) Feinsedimentakkumulationen gut zu sehen sind, ist die Sedimentation von Schwebstoffen in den Stauräumen Ybbs-Persenbeug, Melk und Freudenu kaum zu beobachten. Die Unterschiede sind am ehesten durch die unterschiedlichen Stauhöhen (größer in Aschach, Altenwörth und Greifenstein) zu begründen. In Aschach kommt hinzu, dass es sich um das erstes KW mit größerer Stauhöhe nach Einmündung des Inns handelt und es somit wie die Kopfstufe einer Kraftwerkskette wirkt. Räumlich und zeitlich Sedimentations- und Anlandungsprozesse, vor allem auch während großer Hochwässer, zeigen unterschiedliche Muster zwischen den einzelnen Stauräumen. Das heißt sie sind nicht direkt übertragbar zwischen einzelnen Stauräumen. Wie schon von Nachtnebel et al. (1998) festgestellt ändern sich Größe der transportierten Korngrößen und der Transportmodus (Geschiebe oder Schwebstoff) in gestauten Abschnitten in Abhängigkeit von Durchfluss und Längsposition im Stau. Als eher generelles Bild hinsichtlich Unterteilung der Stauräume in der Länge zeigt sich, dass die größten Sedimentationen auf den ersten Kilometern stromauf der Kraftwerke stattfinden, in Richtung stromauf abnehmen, mit Eintiefungstendenzen stromauf der Stauwurzel.

Die Standorte und Mengen der in Österreich durchgeführten Baggerungen veränderten sich im Laufe der Jahre vor allem durch Arbeiten im Rahmen der Nieder- und Mittelwasserregulierung, sowie durch den Bau von zehn Kraftwerken zwischen 1955 und 1997. Seit Mitte der 1990er Jahre fand ein Paradigmenwechsel statt und es ist ein allmählicher Rückgang der gebaggerten (entfernten) Kiesmengen zu beobachten. Anstatt den aus Erhaltungsbaggerungen gewonnenen Kies dem Strom zu entziehen, wurde er entweder für den Bau von Kiesbänken und -inseln verwendet oder im Hauptstrom (hauptsächlich östlich von Wien) wieder verklappt. Insbesondere die Wiederverwendung des zur Aufrechterhaltung der Schifffahrtsrinne entnommenen Baggermaterials in der freien Fließstrecke östlich von Wien, hat sich in den letzten 20 Jahren mehrmals geändert: während vor 2006 das Material teilweise noch entnommen wurde, wurde danach das gesamte Baggergut zunächst stromab und später auch flussauf der Baggerstellen im Hauptstrom verklappt. Ab 2015 wurde schließlich die stromaufwärts gerichtete Transferstrecke deutlich auf rund 11 km erhöht (Simoner, 2018). Die Kieszugaben stromab des Kraftwerks Freudenu in der Erhaltungsstrecke (Strom-km 1921 bis 1910) betrug in den Jahren 1996 bis 2017 ca. 186.000 m<sup>3</sup>/a (Abbildung 79). Diese Menge wurde kürzlich auf 235.000 m<sup>3</sup>/a erhöht (BMNT, 2018b), und von 2018 bis 2020 wurden im Mittel 244.000 m<sup>3</sup>/a zugegeben (DonauConsult, 2021).

Unmittelbar nach den Hochwasserereignissen im August 2002 und Juni 2013 wurden in großen Bereichen der Vorländer die Sedimentanlandung erhoben und aufgezeichnet (BMLFUW, 2015). Für einzelne Bereiche der Donau, wie dem Tullnerfeld Nord und dem Bereich unterhalb des KW Freudenaus, sind keine Aufzeichnungen vorhanden. Für diese Abschnitte wurden die Anlandungsmengen geschätzt (BMLFUW, 2015). Bezogen auf die zugehörigen Stromkilometer, wurden bei beiden Hochwasserereignissen die höchsten Anlandungen im Machland, im Bereich UW Abwinden und in der Überströmstrecke Wallsee festgestellt. Aus einem Vergleich mit anderen Daten



(BMLFUW, 2015) ist zu vermuten, dass die Anlandungsmengen im Machland überschätzt wurden und auch die anderen Werte sind mit einer gewissen Unsicherheit behaftet.

Im Rahmen der Erstellung einer Sedimentbilanz können die Sedimentquellen und -senken an der österreichischen Donau identifiziert werden. Für eine detaillierte Aufstellung und Berechnung der Sedimentbilanz werden einige Komponenten mit unzureichender Genauigkeit erfasst. So wird etwa derzeit nur an der Messstelle Hainburg Straßenbrücke der Schwebstofftransport unter Berücksichtigung der Verteilung der Schwebstoffkonzentration im Querprofil und in ausreichender zeitlicher Auflösung erfasst. Der Geschiebetransport wird überhaupt nur an der Messstelle Hainburg Straßenbrücke regelmäßig gemessen. Bei der Erfassung des Schwebstofftransports wurde mit dem Leitfaden „Schwebstoffe im Fließgewässer“ (BMLFUW, 2008; 2017b) eine einheitlich Mess- und Auswertanleitung für österreichische Fließgewässer geschaffen, die eine Harmonisierung der Datenerhebung zumindest an den österreichischen Basismessstellen gewährleistet. Für die Geschiebemessung gibt es zwar international Anleitungen und Empfehlungen, eine für Österreich abgestimmte Anleitung gibt es allerdings nicht. Darüber hinaus werden an der österreichischen Donau Informationen über Korngrößen sowohl vom transportierten Material als auch an der Sohle meist nur im Rahmen von Projekten gewonnen und wurden kaum systematisch über längere Abschnitte erhoben. Im Rahmen der Untersuchungen am Rhein hat sich diese Information aber als besonders wichtig für die Erstellung der Sedimentbilanz herausgestellt (Frings et al., 2019). Auch die Rolle von Sand in Kiesbettflüssen in Zusammenhang von Erosion wird derzeit in der Literatur divers diskutiert (z.B. Frings und Ten Brinke, 2018; Frings et al., 2019). Das Monitoring an der österreichischen Donau sollte daher in diesen Bereichen noch ausgebaut und teilweise optimiert und harmonisiert werden.

Zur Verbesserung des Verständnisses von Sedimentprozessen bei Hochwasserereignissen ist die Durchführung eines Sedimentmonitorings während Hochwasserereignissen sowie die Ereignisdokumentationen für Analysen nach dem Hochwasser von großer Bedeutung. Dies trägt auch zur Verbesserung des Prozessverständnisses in Stauräumen, frei fließenden Abschnitten und deren Interaktion bei. Diese Daten können auch als Input und Kalibrierungs- bzw. Validierungsparameter für numerische Simulationen dienen. Numerische Simulationen, die zur Hochwasservorhersage, zur Planung oder zur Bewertung von Maßnahmen zur Hochwasserminderung sowie zum verbesserten Sedimentmanagement eingesetzt werden, sollten Sedimenttransport und morphologische Prozesse einbeziehen. Die Berücksichtigung von Sedimenten in der Planungsphase von (Hochwasserschutz-) Maßnahmen ist von hoher Bedeutung, da bei Hochwasserereignissen große Mengen an Sedimenten transportiert werden können und signifikante Veränderungen des Flussbettes (Erosion und Sedimentation) auftreten können.

Veränderungen der Gewässersohle, ob langfristig oder kurzfristig, können bei Hochwasserereignissen negative Auswirkungen auf den **Hochwasserschutz** haben. Die Erosion des Flussbettes kann zur Instabilität von Hochwasserschutzanlagen oder bei Hochwasserereignissen zum Versagen der Schutzanlagen führen. Sedimentation kann den Pegel des Flussbettes und damit den Wasserspiegel anheben und so zu einer früheren Überflutung führen. Darüber hinaus können Sedimentablagerungen in Stauseen oder Rückhaltebecken den Hochwasserspiegel anheben und bei großen Hochwasserereignissen zu einer Remobilisierung von Feinsedimenten führen, wodurch sich die Schäden im Hochwasserfall erhöhen.

Die **Schifffahrt** ist ein wichtiger Faktor an der Donau und daher sollte der gute Navigationszustand (GNS) nach Möglichkeit erreicht werden. In Anbetracht der hohen Sedimentdynamik der Donau in freifließenden Bereichen ist die Aufrechterhaltung der Schifffahrtsbedingungen unumgänglich. Dennoch sollte dies nicht im Widerspruch zum natürlichen Sedimentregime stehen und die Schifffahrtsmaßnahmen sollten darauf abzielen, ein dynamisches Gleichgewicht des Flussbettes herzustellen. Alle zukünftigen Arbeiten sollten im Einklang mit der "Gemeinsamen Erklärung zur Binnenschifffahrt und zur ökologischen Nachhaltigkeit im Donaauraum" (ICPDR, 2007) stehen, deren Hauptziel die Erhaltung des Sedimentgleichgewichts und die Verbesserung des Umweltzustands des Flusses ist.

Die Entwicklung eines Sedimentmanagementkonzepts und die Umsetzung von Maßnahmen zur Verbesserung des Sedimentregimes und zur Reduzierung von Flussabschnitten mit Sedimentation oder Erosion für das Hochwassermanagement sind daher von großer Bedeutung, um **Hochwasserschutz** und **gute Schifffahrtsbedingungen** zu ermöglichen.

Für ein effektives Sedimentmanagement müssen alle Entscheidungsebenen die Bedeutung von Sedimenten verstehen und sedimentbezogene Themen in das Gewässermanagement im gesamten Einzugsgebiet integrieren. Zum Beispiel sollte das Sedimentmanagement in den nationalen Gewässermanagementplan (gemäß EU-Wasserrahmenrichtlinie) und den nationalen **Hochwasserrisikomanagementplan** (gemäß EU-Hochwasserrichtlinie) integriert werden.

Bei der Umsetzung von Sedimentmanagementmaßnahme muss ein robuster integrierter Planungsprozess durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass die praktischste, effizienteste, umweltfreundlichste und kostengünstigste Option gewählt wird. In einigen Fällen kann eine Kombination aus verschiedenen Maßnahmen die beste Option sein. Die beste Lösung sollte von Fall zu Fall unter Berücksichtigung des größeren räumlichen Maßstabs, unterschiedlicher Randbedingungen und Anforderungen ausgewählt werden. Einzugsgebietsbezogenen Maßnahmen wie etwa Landnutzungsänderungen können sowohl zum Ausgleich des beschleunigten Oberflächenabflusses (ICPDR, 2004) als auch zur Verbesserung des Sedimentregime beitragen, indem sie z.B. die Bodenerosion in landwirtschaftlichen Gebieten reduzieren, und sollten daher intensiviert werden.

Bei der Planung von Maßnahmen für den **Hochwasserschutz** ist es notwendig, Sohlhöhenänderungen zu berücksichtigen, die bei Hochwasserereignissen auftreten können. Morphologische Veränderungen können zu signifikanten Sohlhöhenänderungen führen, die folglich den Wasserstand während eines Hochwassers verändern. Hochwasserschutzmaßnahmen sollten die bewegliche Sohle und die daraus resultierenden Wasserspiegeldifferenzen in der Planungsphase des technischen Hochwasserschutzes berücksichtigen. In Abschnitten mit Erosionstendenzen sollte eine Stabilisierung oder sogar eine Erhöhung der Gewässersohle in Betracht gezogen werden. Dabei ist bei Schutzmaßnahmen darauf zu achten, wie die Sohlenerhöhung und der daraus resultierende Anstieg des Wasserspiegels kompensiert werden kann.

In der österreichischen Donau wird die Entnahme von Grobsedimenten nicht mehr durchgeführt und Baggerungen werden nur noch aus bestimmten Gründen, z.B. für die **Schifffahrt** oder den **Hochwasserschutz**, vorgenommen. Baggerungen sollten auch weiterhin auf ein Minimum beschränkt werden und die heute übliche Praxis, das Baggergut im Flusssystem zu belassen, fortgesetzt werden. Dies kann entweder durch die Wiedereinbringung des Materials weiter flussaufwärts oder durch den

Bau von Strukturen wie Inseln und Kiesbänken geschehen. Die Sedimentqualität und andere ökologische Grenzen müssen berücksichtigt werden, z.B. die Dauer und die maximalen Konzentrationen etwa im Zusammenhang mit Laichzeiten.

Auch die Wiederherstellung und Wiederanbindung natürlichen Überflutungsflächen (z.B. Entfernung oder Rückverlegung von Hochwasserdeichen) von Flüssen kann zur Abminderung negative Auswirkungen von Überflutungen beitragen (ICPDR, 2004) und gleichzeitig die Fließgeschwindigkeiten und die Sohlschubspannung bei **Hochwasser** reduzieren und somit die Erosion der Gewässersohle verhindern oder verringern, was insbesondere in frei fließenden, erosionsgefährdeten Abschnitten wichtig ist. Um die Bildung von Uferrehnen zu verhindern oder zu reduzieren, sollte dort, wo dies möglich ist, Ufererosion zuzulassen werden. Wenn eine natürliche Beseitigung durch Ufererosion nicht in Frage kommt, kann eine künstliche Beseitigung als Option in Betracht gezogen werden, um eine frühere Überflutung der Auen zu ermöglichen. Dies kann wichtig sein, da die Verschlechterung der lateralen Konnektivität zwischen Hauptgerinne und Au den Wasserstand im Hauptgerinne bei bordvollem Abfluss erhöht, wodurch höhere Schubspannungen auftreten und das Risiko der Sohleintiefung steigt. Durch Renaturierungsmaßnahmen wie Wiederanbindung von Seitenarmen und der Wiederherstellung der natürlichen Ufer und anschließender Gewässerverbreiterung kann die Sedimenttransportkapazität verringert werden. Dabei ist darauf zu achten, dass durch die Seitenerosion keine negativen Auswirkungen, z.B. auf die **Schifffahrt** oder den **Hochwasserschutz**, entstehen. sollte Die Optimierung bzw. Reduzierung bestehender Regulierungsbauwerke wie Buhnen und Leitwerke können die Sedimenttransportkapazität und die Sohleintiefung weiter reduzieren. Die genannten Maßnahmen haben zusätzlich einen positiven ökologischen Nutzen. Auch bei einem Neubau von Regulierungsmaßnahmen sollte darauf geachtet werden, dass der Einfluss auf das Sedimentregime minimiert wird und sie ökologisch verträglich sind. Dies kann etwa durch alternative Buhnentypen, (Kies-)Bänke und Inseln, anstelle von technischen Maßnahmen erreicht werden. Auch andere, nicht-technische Maßnahmen wie die Reduzierung der Fahrrinnenbreite, Verlegung der Fahrrinne oder Anlegestellen können im Bereich der **Schifffahrt** in Betracht gezogen werden.

Im Hinblick auf die Sedimentationsrate innerhalb des Stauraums ist eine Verbesserung des Sedimentregimes durch Wiederherstellung der Sedimentkontinuität eines der Hauptthemen des Sedimentmanagements. Sedimentationsprozesse können in der Regel nicht eliminiert, aber reduziert werden. Maßnahmen zur Verbesserung der Sedimentkontinuität bei Kraftwerken müssen individuell untersucht werden, wobei auch eine Kombination von Maßnahmen sinnvoll sein kann. Dabei sollte nicht nur die Möglichkeit des Durchtransportes von Feinmaterial sondern auch der gröberen Sedimente untersucht werden. Eine Freisetzung von Feinmaterial sollte kontrolliert/geplant und ökologisch verträglich erfolgen, in dem Wissen, dass eine Sedimentkontrolle bei großen Hochwassern kaum möglich sein wird. Langfristig sollte der Schwerpunkt auf ein kontinuierlicheres und natürlicheres Sedimentregime gelegt werden, indem entweder Sedimentablagerungen oder häufigere Remobilisierungen verhindert werden.

Langfristig sollte darauf abgezielt werden, die Sedimentkontinuität in der Donau und ihren Nebenflüssen zu verbessern. Daher sind weitere Forschungen notwendig, um innovative Ansätze und Maßnahmen zu entwickeln, z.B. Sedimentbypass oder Schleusen, insbesondere für grobes Material.

## 6 Literatur

- Alpine Convention (2019). Natural Hazard Risk Governance – Report on the state of the Alps. Alpine Signals – Special Edition 7. Innsbruck, Austria.
- Asselman, N. (1999). Suspended sediment dynamics in a large drainage basin: the River Rhine. *Hydrol. Process.* 13, 1437–1450.
- Bauer, F. (1965). Der Geschiebehaushalt der bayerischen Donau im Wandel wasserbaulicher Maßnahmen. *Die Wasserwirtschaft*, 55. Jahrgang – Heft 4/5.
- Baumgartner, J. (1860). Die Beschaffenheit des Strudels und Wirbels der Donau und der an denselben ausgeführten Regulierungswerke. *Försters Allgemeine Bauzeitung*, Jg. 1860, 25, S. 65-74, III.329.
- Belsky, A.J., Matzke, A., Uselman, S. (1999). Survey of livestock influences on stream and riparian ecosystems in the western United States. *Journal of Soil and Water Conservation* 54(1):419-431.
- BMLFUW (2008). Schwebstoffe im Fließgewässer – Leitfaden zur Erfassung des Schwebstofftransports. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 1. Auflage, Wien.
- BMLFUW (2015). Task Force Donau: Feinsedimentmanagement an der österreichischen Donau. Endbericht. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung IV/2 und Abteilung IV/5, Wien.
- BMLFUW (2017a). Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan 2015. Koordination: BMLFUW, Sektion IV Wasserwirtschaft. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien
- BMLFUW (2017b). Schwebstoffe im Fließgewässer – Leitfaden zur Erfassung des Schwebstofftransports. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2. Auflage, Wien. ([https://www.bmnt.gv.at/dam/jcr:00051448-0320-4544-b6a4-320325dcfd86/Schwebstoffe\\_im\\_Fliessgewaesser\\_HP\\_BMLFUW.pdf](https://www.bmnt.gv.at/dam/jcr:00051448-0320-4544-b6a4-320325dcfd86/Schwebstoffe_im_Fliessgewaesser_HP_BMLFUW.pdf))
- BMNT (2018a). Hydrographisches Jahrbuch von Österreich 2016. 124. Band, Hydrographischer Dienst in Österreich, Wien.
- BMNT (2018b). Sohlentwicklung in der freien Fließstrecke unterstrom Kraftwerk Freudenu. Endbericht. Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Abteilung I/2 und Abteilung I/5. Wien.
- Bock, N., Gökler, G., Reindl, R., Reingruber, J., Schmalfuß, R., Badura, H., Frik, G., Leobner, I., Lettner, L., Scharsching, M., Spreitzer, R., Thöni, M. (2019). Feststoffmanagement bei Wasserkraftanlagen in Österreich, Kanal. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 71.
- Buijse, A.D., Coops, H., Staras, M., Jans, L.H., Van Geest, G.J., Grift, R.E., Ibelings, B.W., Oosterberg, W. and Roozen, F.C.J.M. (2002). Restoration strategies for river floodplains along large lowland rivers in Europe. *Freshwater Biology* 47: 889–907.
- Bundesministerium für Handel und Wiederaufbau (1956). Österreichischer Wasserkraft-Kataster.

- Bunte, K. (2004). State of the science review. Gravel mitigation and augmentation below hydroelectric dams: A geomorphological perspective. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Report submitted to the Stream Systems Technology Center, Fort Collins, United States.
- Camaro-D (2019). Visionary Danube: GUIDR – Guidance for the Danube region for sustainable land use planning. WP T3 Report of the DTP Project Camaro-D.
- Dahl, T. A., Theiling, C. H., Echevarria, W. (2017). Overview of levee setback projects and benefits. ERDC/CHL CHETN-VII-17. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center.
- Dai, F.C., Lee, C.F., Ngai, Y.Y. (2002). Landslides risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology* 64: 65–87.
- DANUBEparksCONNECTED (2021). The Danube Wild Island Habitat Corridor. <https://wildisland.danubeparks.org>. Abgefragt im November 2021.
- DanubeSediment (2018). Interactions of Key Drivers and Pressures on the Morphodynamics of the Danube. Deliverable of the Interreg Danube Transnational Project DanubeSediment co-funded by the European Commission, Bucharest.
- DanubeSediment (2019). Analysis of sediment data collected along the Danube. Deliverable of the Interreg Danube Transnational Project DanubeSediment co-funded by the European Commission, Budapest.
- DonauConsult (2021). Technischer Bericht - Referenzsohle und Geschiebezugabe unterhalb des Kraftwerks Freudenu. Geschiebezugabe Erhaltungsstrecke, Jahresbericht 2020. DonauConsult im Auftrag von VERBUND Hydro Power GmbH.
- DVWK (1986). Schwebstoffmessungen, Regeln zur Wasserwirtschaft Nr. 125/1986; Kommissionsvertrieb Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.
- Eaton, B.C, Lapointe, M.F. (2001). Effects of large floods on sediment transport and reach morphology in the cobble-bed Sainte Marguerite River. *Geomorphology* 40, 291–309.
- Ehrenberger, R. (1931). Direkte Geschiebemessungen an der Donau bei Wien und deren bisherige Ergebnisse. *Die Wasserwirtschaft* 34: 581–589.
- Ehrenberger, R. (1942). Geschiebetreib und Geschiebefracht der Donau in Wien auf Grund direkter Messungen. *Wasserkraft und Wasserwirtschaft*, Jg. 36, Heft 12.
- Frings, R.M., Gehres, N., Promny, M., Middelkoop, H., Schüttrumpf, H., Vollmer, S. (2014). Today's sediment budget of the Rhine River channel, focusing on the Upper Rhine Graben and Rhenish Massif. *Geomorphology* 204, 573–587.
- Frings, R.M., Ten Brinke, W.B.M. (2018). Ten reasons to set up sediment budgets for river management. *Int. J. River Basin Manage.* 16 (1), 35–40.
- Frings, R. M., Hillebrand, G., Gehres, N., Banhold, K., Schriever, S., Hoffmann, T. (2019). From source to mouth: Basin-scale morphodynamics of the Rhine river. *Earth-Science Reviews*, 196, 102830. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.002>.
- Geitner, W. (1969). Die Mittel- und Niederwasserregulierung der Donau in Österreich. *Österreichische Wasserwirtschaft*, Jahrgang 21 – Heft 1/2 – 1969.

- Geitner, W. (1978). Die Erhaltungs- und Regulierungsarbeiten an der österreichischen Donau in den Jahren 1968 bis 1977; Österreichische Wasserwirtschaft, Heft 9/10.
- Glas, M., Glock, K., Tritthart, M., Liedermann, M., Habersack, H. (2018). Hydrodynamic and morphodynamic sensitivity of a river's main channel to groyne geometry. *Journal of Hydraulic Research* 56, 714 –726. doi:10.1080/00221686.2017.1405369.
- Gmeiner, Ph., Liedermann, M., Haimann, M., Tritthart, M., Habersack, H. (2016). Grundlegende Prozesse betreffend Hydraulik, Sedimenttransport und Flussmorphologie an der Donau. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 68, 208–216.
- Gruber, O. (1969). *Gewässerkunden und Hydrographie im Bundesstrombauamt*, Wien
- Gruber, O. (1973). Schwebstoffmessungen, ihre Auswertung und Interpretation im Bereich der österreichischen Donau. In: *Wiener Mitteilungen Bd. 14, Hydrologie-Fortbildungskurs 1973*, Beitrag K (12 Seiten). Institut für Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Habersack, H., Piégay, H. (2007). River restoration in the Alps and their surroundings: past experience and future challenges. In: Habersack, H., Piégay, H., Rinaldi, M. (Eds.), *Gravel-bed rivers 6, From process understanding to river restoration*, *Developments in Earth Surface Processes* 11, 703-735.
- Habersack, H., Schober, B., Krapesch, G., Jäger, E., Muhar, S., Poppe, M., Preis, S., Weiss, M., Hauer, C. (2010). Neue Ansätze im integrierten Hochwassermanagement: Floodplain Evaluation Matrix FEM, flussmorphologischer Raumbedarf FMRB und räumlich differenziertes Vegetationsmanagement VeMaFLOOD. *Österr Wasser- und Abfallwirtschaft*, 15–21.
- Habersack, H., Liedermann, M., Tritthart, M., Hauer, C., Klösch, M., Klasz, G., Hengl, M. (2012). Maßnahmen für einen modernen Flussbau betreffend Sohlstabilisierung und Flussrückbau – Granulometrische Sohlverbesserung, Bühnenoptimierung, Uferrückbau und Gewässervernetzung. *Österr Wasser- und Abfallwirtschaft Volume 64, Issue 11–12*, 571–581.
- Habersack, H., BMLFUW, Pucher, K., Schober, B., Samek, R., Hackel, C. (2015). *Hochwasserdokumentation Donau 2013. Ereignisdokumentation*, Universität für Bodenkultur Wien.
- Habersack, H., Hein, T., Stanica, A., Liska, I., Mair, R., Jager, E., Hauer, C., Bradley, C. (2016). Challenges of river basin management: Current status of, and prospects for, the River Danube from a river engineering perspective. *SCI TOTAL ENVIRON.* 543: 828-845.
- Habersack, H., Pessenlehner, S., Liedermann, M., Gmeiner, Ph, Szinetar, M., Tritthart, M. (2017). Analyse der Sohleintiefung anhand von Single Beam Daten. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau der Universität für Bodenkultur Wien. Christian Doppler Labor für Innovative Methoden in Fließgewässermonitoring, Modellierung und Flussbau. Im Auftrag der via donau – Österreichische Wasserstraßen-Gesellschaft mbH.
- Habersack, H., Baranya, S., Holubova, K., Vartolomei, F., Skiba, H., Schwarz, U., Krapesch, M., Gmeiner, Ph., Haimann, M. (2019a). *Sediment Manual for Stakeholders*. Output 6.2 of the Interreg Danube Transnational Project DanubeSediment co-funded by the European Commission, Vienna.
- Habersack, H., Baranya, S., Holubova, K., Vartolomei, F., Skiba, H., Babic-Mladenovic, M., Cibilic, A., Schwarz, U., Krapesch, M., Gmeiner, Ph., Haimann, M. (2019b). *Danube Sediment Management*

- Guidance. Output 6.1 of the Interreg Danube Transnational Project DanubeSediment co-funded by the European Commission, Vienna.
- Haidvogel, G., Hohensinner, S., Schmutz, S. & H. Waidbacher (2003). Typology of the River Danube and descriptions of reference condition based on historical data and expert judgement. Department of Hydrology, Fisheries and Aquaculture, University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Wien: 19 pp. (Annex 2).
- Haimann, M., Moog, O., Stubauer, I., Tritthart, M., Habersack, H. (2014). Auswirkungen von Baggerungen und Verklappungen hochwasserbedingter Feinsedimentablagerungen am Fallbeispiel Winterhafen Linz/Donau. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft volume 66, 316–326.
- Haimann, M., Aigner, J., Gmeiner, P., Lalk, P., Habersack, H. (2018). Hochwasser und Feststoffe: vom Sedimenttransport zum flussmorphologischen Raumbedarf. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 70, 78-89; ISSN 0945-358.
- Highland, L.M., Bobrowsky, P. (2008). The landslide handbook—A guide to understanding landslides: Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p.
- Hinderer, M. (2012). From gullies to mountain belts: A review of sediment budgets at various scales. Sedimentary Geology, 280, 21-59.
- Hoffmann, T. (2015). Sediment residence time and connectivity in non-equilibrium and transient geomorphic systems. Earth-Science Reviews, 150, 609-627.
- Hohensinner, S. (2008). Rekonstruktion ursprünglicher Lebensraumverhältnisse der Fluss Auen-Biozönose der Donau im Machland auf Basis der morphologischen Entwicklung von 1715 – 1991. Dissertation an der Universität für Bodenkultur Wien, 307 S., 27 Karten.
- Hohensinner, S. & Jungwirth, M. (2016). Die unbekannte dritte Dimension: Geländehöhen, Gewässertiefen und Dynamik österreichischer Donaulandschaften vor der Regulierung. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 68, 7-8, 324.
- Hunziker, R. (2012). Erfahrungen mit der Aufweitung von Fließgewässern in der Schweiz. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft (64), 379-388.
- HZB – Hydrographisches Zentralbüro (1937). Schwebstoff- und Geschiebeaufnahmen einiger österreichischer Flüsse. Hydrographischer Dienst in Österreich, Wien.
- ICPDR (2004). Flood Action Programme - Action Programme for Sustainable Flood Protection in the Danube River Basin. ICPDR Document IC/082. International Commission for the Protection of the Danube River, Vienna.
- ICPDR (2007). Development of Inland Navigation and Environmental Protection in the Danube River Basin - Joint Statement on Guiding Principles. International Commission for the protection of the Danube River, Vienna.
- ICPDR (2009). Danube River Basin District Management Plan, Part A – Basin-wide overview. Report, International Commission for the Protection of the Danube River, Vienna.

- Jähnič, S. C., Brunzel, S., Gacek, S., Lorenz, A. W. & Hering, D. (2009). Effects of re-braiding measures on hydromorphology, floodplain vegetation, ground beetles and benthic invertebrates in mountain rivers. *Journal of Applied Ecology*, 46, 406 - 416.
- Jungwirth, M., Haidvogel, G., Hohensinner, S., Muhar, S., Schmutz, S., Waidbacher, H. (2005). Leitbild-specific measures for the rehabilitation of the heavily modified Austrian Danube River. *Archiv für Hydrobiologie Supplementband* 155:17–36.
- Jungwirth, M., Haidvogel, G., Hohensinner, S., Waidbacher, H. & Zauner, G. (2014). Österreichs Donau. Landschaft – Fisch – Geschichte. Institut für Hydrobiologie und Gewässermanagement, BOKU Wien, 420 S.
- Kaplan, J., Krumhardt, K.-M., Zimmermann, N. (2009). The prehistoric and preindustrial deforestation of Europe. *Quaternary Science Reviews* 28 (2009) 3016–3034.
- Karimae Tabarestani, M., Zarrati, A.R. (2014). Sediment transport during flood event: A review. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 12 (2), 775–788, doi:10.1007/s13762-014-0689-6.
- Klasz, G., Gabriel, H., Schmalzfuss, R., Baumgartner, C. (2016). Extent and dynamics of bed erosion of the Danube east of Vienna—river morphology and water management aspects. *ÖWAW*, 68. 199-207.
- Klicpera, H. & Prazan, H. (2000). Schwebstoffablagerungen in den Stauräumen der Donaukraftwerke Jochenstein und Aschach. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft Jahrgang* 52, Heft 9/10, 234-241.
- Kobilka, J.G., Hauck, H.H. (1982). Feststoffhaushalt in den Stauräumen der österreichischen Donaukraftwerke. *Internationale Talsperrenkommission*, 14. Talsperrenkongress in Rio de Janeiro 1982. *Die Talsperren Österreichs*, Heft 26.
- Kralik, M. & Augustin-Gyurits, K. (1994). Stauraumfeinsedimente als "Geochronometer" von Schad- oder Rohstoffen: Moderner Sedimentologie, Mineralogie, Geochemie und Verwertung der Donausedimente von Aschach (Oberösterreich). In: *Jubiläumsschrift 20 Jahre geologische Zusammenarbeit Österreich-Ungarn*, Wien November 1994. p. 437-464.
- Kralik, M. & Sager, M. (1986). Umweltindikator „Schwermetalle“: Gesamtgehalte und Mobilität in österreichischen Donausedimenten. In: *Umweltgeologie Band 79. Mitteilungen der österreichischen geologischen Gesellschaft*. Wien.
- Krapesch, G., Hauer, C., Habersack, H. (2011). Scale orientated analysis of river width changes due to extreme flood hazards, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 2137–2147.
- Lenzi, M.A., Marchi, L. (2000): Suspended sediment load during floods in a small stream of the Dolomites (northeastern Italy). *Catena* 39: 267–282.
- Liedermann, M., Gmeiner, Ph., Glas, M., Tritthart, M., Habersack, H. (2016). Funktionalität der getesteten flussbaulichen Maßnahmen im Pilotprojekt Bad Deutsch-Altenburg [Functionality of the tested river engineering measures within the pilot project Bad Deutsch-Altenburg at the Austrian Danube River]. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 68, 217–225.
- Liedermann, M., Gmeiner, Ph., Kreisler, A., Tritthart, M., Habersack, H (2018): Insights into bedload transport processes of a large regulated gravel-bed river. *Earth Surface Processes and Landforms* 2018; 43(2): 514-523.



- Mader, H., Steidl, T., Wimmer, R. (1996). Abflussregime österreichischer Fließgewässer. Beitrag zu einer bundesweiten Fließgewässertypologie. Austrian Federal Environment Agency (FEA), VIENNA, Monographien 82: 1-192.
- Mühlbauer, M. (2017): Uferstrukturierung Wachau - Zwischenbericht der ökologischen Bauaufsicht 01.2017. ezb, TB Zauner GmbH. Im Auftrag der via donau – Österreichische Wasserstraßen-Gesellschaft mbH.
- Mühlhofer, L. (1933). Untersuchungen über die Schwebstoff und Geschiebeführung des Inn nächst Kirchbichl (Tirol). Die Wasserwirtschaft 1(6), 23 pp.
- Nachtnebel, H.P., Seidelmann, R., Müller, H.W., Schwaighofer, B. (1998). Herkunft und Zusammensetzung der Schwebstoffe in der Donau und ihren wichtigsten Zubringern. In: Schriftenreihe der Forschung im Verbund. Band 45.
- Nachtnebel, H.P., Debene, A., Herget, R.A., (2004). Schwebstoffbilanzierung im Bereich von Stauräumen an der österreichischen Donau. Analyse der Hochwasserereignisse vom August 2002 – FloodRisk (Workpackage Donau Teilprojekt 02) 180.
- NEWADA duo (2014). REPORT ON CURRENT AND FUTURE SURVEYING & MAINTENANCE ACTIVITIES PART 1 - DOCUMENT SCOPE + NATIONAL FAIRWAY PARAMETERS. NEWADA duo Act.6.2 Report 6.2 consolidated Pt-1 final.
- NWRM (2015). Natural water retention measures: 53 NWRM illustrated. NWRM Pilot Project financed by the Directorate-General for Environment, European Commission.
- Pessenlehner, S., Liedermann, M., Tritthart, M., Gmeiner, Ph., Habersack, H. (2016). River bed degradation and morphological development before and after river restoration measures at the Danube River east of Vienna. 12th International Conference on Hydrosience and Engineering Hydro-Science and Engineering for Environmental Resilience, 2016, Tainan, Taiwan.
- Piégay, H., Darby, S., Mosselman, E., Surian, N. (2005). A review of techniques available for delimiting the erodible river corridor: a sustainable approach to managing bank erosion. River Research and Applications, 21, pp. 773-789.
- Platina-2 (2016). Good Practice Manual on Inland Waterway Maintenance Focus: Fairway maintenance of free-flowing rivers. Final Report, Platina-2 project deliverable D4.6.
- Prazan, H. (1990). Über Schwebstoffablagerungen in den Stauräumen der Donaukraftwerke in Österreich. In: Österreichische Wasserwirtschaft 42, Heft 3/4, S.73-84.
- Puckridge, J.T., Sheldon, F., Walker, K.F., Boulton, A.J. (1998). Flow variability and the ecology of large rivers. Mar Freshwater Res 49:55–72.
- Radler, S., Summer, W., Strobl, Th., Scheuerlein, H. (1993). Der Sedimenthaushalt der österreichischen Donau. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, Universität für Bodenkultur, Wien. Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München. Gutachten im Auftrag Donaukraft – Österreichische Donaukraftwerke AG.
- Reid, L.M. & Dunne, T. (1996). Rapid Evaluation of Sediment Budgets: Catena: Reiskirchen.
- Rohde, S., Schütz, M., Kienast, F. and Englmaier, P. (2005). River widening: an approach to restoring riparian habitats and plant species. River Res. Applic., 21: 1075-1094. doi:10.1002/rra.870.

- Roni, P., Hanson, K., Beechie, T., Pess, G., Pollock, M., Bartley, D.M. (2005). Habitat rehabilitation for inland fisheries. Global review of effectiveness and guidance for rehabilitation of freshwater ecosystems. FAO Fisheries Technical Paper. No. 484. Rome, FAO. 2005. 116p.
- Rosenauer, F. (1947). Wasser und Gewässer in Oberösterreich. Schriftenreihe der Oberösterreichischen Landesbaudirektion Nr.1. Linz.
- Schmautz, M., Aufleger, M., Strobl, T. (2000). Wissenschaftliche Untersuchung der Geschiebe- und Eintiefungsproblematik der österreichischen Donau. Bericht im Auftrag von Verbund – Austrian Hydro Power AG (AHP), Wien. Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München.
- Schmautz, M., Strobl, Th. (2000). Bericht über die Entnahme und Auswertung von Sohlproben aus der Donaustrecke Wachau. Bericht im Auftrag von Verbund – Austrian Hydropower AG und Wasserstraßendirektion. Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München.
- Schmutterer, J. (1952). Welches Ausmaß haben die Sohlenänderungen der Donau? Österreichische Wasserwirtschaft, Jahrgang 4 – Heft 8/9 – 1952.
- Schmutterer, J. (1959). Die Regulierung der österreichischen Donau und ihre Voraussetzungen. In: Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft Dreiundzwanzigster und vierundzwanzigster Band 1955/57. Springer Verlag Heidelberg-Berlin.
- Schmutterer, J. (1961).- Geschiebe- und Schwebstoffführung der österreichischen Donau. Wasser und Abwasser 1961, Wien: 61-70.
- SEPA (2010). Engineering in the Water Environment Good Practice Guide: Sediment Management. Scottish Environmental protection Agency, Edinburgh, Scotland.
- Simoner, M. & Berger, H. – viadonau (2016). Wasserspiegellagen-Stabilisierung, Sedimenthaushalt und Geschiebemanagement – Zukunftsperspektiven aus Sicht der viadonau. Presentation at: 20 Jahre Nationalpark Donau-Auen.
- Simoner, M. - viadonau (2018). Sedimente und Wasserstraßenmanagement – Probleme und Lösungen. Presentation at the 1st National Stakeholder Workshop of the project DanubeSediment, Vienna.
- Slaymaker, O. (2003). The sediment budget as conceptual framework and management tool. Hydrobiologia, 494(1-3), 71-82.
- Smith, D. L., Miner, S. P., Theiling, C. H, Behm, R., Nestler, J. M. (2017). Setback Levees: An Innovative, Cost-Effective, and Sustainable Solution for Improved Flood Management. ERDC/EL SR-17-3. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center.
- Summer, W., Nachtnebel, H.P. (1989). Erosionsvorgänge und Ablagerungen: Fallstudie Donaustau Altenwörth. In: Wiener Mitteilungen Band. 79, Symposium: Hydraulik offener Gerinne, S. 305-315. IWHW, Universität für Bodenkultur Wien.
- Summer, W., Klaghofer, E., Hintersteiner, K. (1996). Trends in soil erosion and sediment yield in the alpine basin of the Austrian Danube. In Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives (Proceedings of the Exeter Symposium, July 1996). IAHS Publ.no. 236.

- Török, G.T., Baranya, S. (2017). Morphological investigation of a critical reach of the upper Hungarian Danube. *PERIODICA POLYTECHNICA-CIVIL ENGINEERING* 61:(4) pp. 752-761.
- Tschochner, F. (1957). Die Donauregulierung in Österreich. *Österreichische Wasserwirtschaft* 9, Heft 5/6.
- Tschochner, F. (1964). La Régularisation du Danube Autrichien. *La Houille Blanche*, No 2-1964, pp. 201-220.
- Turner, A.K. (2018). Social and environmental impacts of landslides. *Innovative Infrastructure Solutions* 3(1):70.
- Turowski, J.M., Rickenmann, D., Dadson, S.J. (2010): The partitioning of the total sediment load of a river into suspended load and bedload: a review of empirical data. *Sedimentology* 57, 1126–1146. doi: 10.1111/j.1365-3091.2009.01140.x
- UNESCO -United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (1993). Schwebstoff- und Geschieberegime der Donau. Die Donau und ihr Einzugsgebiet – Eine hydrologische Monographie.– Folgeband I. Hydrologisches Programm der UNESCO.
- USACE - U.S. Army Corps of Engineers (2012). Assessment of Conceptual Nonstructural Alternative Levee Setbacks along the Missouri River. (Lower L-575 / Upper L-550 and Lower L-550) Final Report.
- VERBUND (1998). VERBUND Umweltbericht 1997. Wien.
- VHP (2013a). Donaukraftwerk Altenwörth Kompensationsbaggerungen im Raum Stein-Krems. Kollaudierungsbericht. Verfasser: Schmalfuß, R. and Salamon, J.
- VHP (2013b). Strom aus dem Strom. Die Wasserkraftwerke an der Donau. VERBUND Hydro Power AG.
- VHP (2014). Donauhochwasser Juni 2013 - Morphologische Veränderungen. Kurzbericht. VERBUND Hydro Power AG. Verfasser: Schmalfuß, Oberlerchner and Grüner.
- viadonau (2012). Die kennzeichnenden Wasserstände der österreichischen Donau – KWD 2010. Bearbeitet von via donau nach dem Stand vom 31.Dezember 2010. Wien, Österreich.
- viadonau (2018). Flussbauliches Gesamtprojekt – Maßnahmenkatalog für die Donau östlich von Wien.
- viadonau (2021a). Übersicht Erhaltungsbaggerungen in den freien Fließstrecken. Stichtag Mai 2021.
- viadonau (2021b). Information zu aktuellen Objektbergungen im Bereich Furt Schwallenbach. Persönliche Kommunikation Markus Simoner, viadonau.
- Ward, J.V. (1998). Riverine landscapes: biodiversity patterns, disturbance regimes, and aquatic conservation. *Biol. Conser*6., 83, 269–278
- Wasserstraßendirektion (1986). Die kennzeichnenden Wasserstände der österreichischen Donau – KWD 1985. Bearbeitet von der Wasserstraßendirektion nach dem Stand vom 1.Jänner 1985. Wien, Österreich.

Wasserstraßendirektion (1997). Die kennzeichnenden Wasserstände der österreichischen Donau – KWD 1996. Bearbeitet von der Wasserstraßendirektion nach dem Stand vom 31.Dezember 1996. Wien, Österreich.

WSD-SW (2007). Kompendium der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest. Mainz: Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest.

Zauner, F. (2001). Der Verlandungsprozess in den Stauhaltungen am Unteren Inn. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Jahrgang 53, Heft 11/12.

Zauner, G., Ratschan, C., Mühlbauer, M., Prack, P., Altenhofer, M. (2011). Studie Revitalisierungspotential Untere Enns. ezb, TB Zauner GmbH. Im Auftrag der Oberösterreichischen Umweltschutzbehörde.

Zauner, G., Jung, M., Ratschan, C., Mühlbauer, M. (2016). Ökologische Sanierung von Fließstrecken und Stauhaltungen der österreichischen Donau – auf dem Weg zur Zielerreichung nach Wasserrahmenrichtlinie. In: Österreichs Wasser- und Abfallwirtschaft 68 (2016), S. 503-512.

Online:

<https://ehyd.gv.at/>

## 7 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

### 7.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Überblick der Durchbruchsstrecken (rote Linien) und der Beckenstrecken (grüne Linien). Modifiziert nach Radler et al. (1993) und Schmautz et al. (2000).....	7
Abbildung 2. Historische Karte des Strudengaus (Strom-km 2078 - 2075) aus dem Jahr 1771. Die Insel Wörth teilt die Donau in den Hössgang (rechter Arm) und den Strudenkanal (linker Arm). Der rote Pfeil markiert den Hausstein (Baumgartner, 1860).....	8
Abbildung 3. Eferdinger Becken (Strom-km 2159 - 2144): Situation im Jahr 1818 (Franziseische Landesaufnahme) bzw. 2018.....	8
Abbildung 4. Links: Regulierung des Aschacher Kachlet (Wasserspiegelgefälle); rechts: Spezielles Sondier- Hebwerk zur Entfernung der Felsblöcke (Schmutterer, 1959).....	9
Abbildung 5. Situation im Jahr 1821 vor der Regulierung, im Jahr 1859 nach der intensiven Regulierung der Donau im östlichen Machland und nach Abschluss der Regulierung 1925 aber noch vor Bau der österreichischen Donaukraftwerke (Stromkilometer 2094 - 2084) (Hohensinner, 2008). ....	10
Abbildung 6. Lage der Donaukraftwerke und der freien Fließstrecken an der österreichischen Donau (Datenbasis Sohlhöhen: VHP und viadonau; Wasserstand und Lage der Donaukraftwerke viadonau, 2012).....	12
Abbildung 7. Überblick Geschiebe- und Schwebstoffmessstellen an der österreichischen Donau und den wichtigsten österreichischen Donauzubringern.....	14
Abbildung 8. Sammler an Teleskopstange mit Einlaufrohr zur Entnahme von Flaschenproben (© BMLFUW 2008, 2017b). ....	17
Abbildung 9. Automatisierter Pumpprobennehmer (© VERBUND). Messstelle an einem VERBUND Kraftwerk (© Verbund) .....	17
Abbildung 10. Trübungssonde Solitax ts-line (© viadonau). ....	18
Abbildung 11. Punktintegrierendes Schwebstoffentnahmegerät US-P63 (links) und US-P61 (rechts) (© IWA/BOKU).....	18
Abbildung 12. Messanhänger mit Schwebstoffentnahmegerät und ADV (links) und Schwebstoffentnahmegerät an einer Messeilbahn (© IWA/BOKU).....	19
Abbildung 13. Vakuumfiltrationsanlage im Labor (© IWA/BOKU). ....	19
Abbildung 14. Konventionelles Auswerteverfahren für Vielpunktentnahmen (BMLFUW, 2017b; verändert nach DVWK, 1986).....	21
Abbildung 15. Verteilung der Schwebstoffkonzentration im Querprofil; Ergebnis einer ADCP-Messung (© IWA/BOKU).....	21
Abbildung 16. Ehrenberger-Sammler (Ehrenberger, 1942). ....	23
Abbildung 17. BfG-Sammler zur Messung des Geschiebetransports (© IWA/BOKU). ....	23
Abbildung 18. a) LKW mit Ladekran; b) Absenkung des Geschiebefängers von der Brücke; c) Schiff mit Bagger zur Durchführung von Schiffsmessungen (© IWA/BOKU). ....	24
Abbildung 19. a) Entleerung einer Geschiebeprobe; b) und c) Geschiebeprobe (© IWA/BOKU). ....	24
Abbildung 20. Ergebnis einer Geschiebetransportberechnung: Korngrößenverteilung, Geschiebetrieb in jeder Lotrechte (inkl. Geschiebetransport – gelb schattiert in der mittleren Grafik), Querprofilmessung (© IWA/BOKU). ....	26
Abbildung 21. Durchfluss-Geschiebe Beziehung der Donau Östlich von Wien bei Bad Deutsch-Altenburg (modifiziert nach Liedermann, et al., 2018). ....	27
Abbildung 22. Mittlere jährliche Schwebstofffracht im Längsverlauf der Österreichischen Donau. Vergleich vor Errichtung der Kraftwerke mit dem Zeitraum 1986 bis 2016 (verändert nach DanubeSediment, 2019).....	28

Abbildung 23. Schwebstoffjahresfrachten (links oben), mittlere Jahresdurchflüsse (links unten) und Doppelsummenkurve der spezifischen Schwebstofffracht und der Abflusspende (rechts) an der Messstelle Engelhartzell (Datengrundlage: HZB, viadonau und Verbund). .....	29
Abbildung 24. Schwebstoffjahresfrachten (links oben), mittlere Jahresdurchflüsse (links unten) und Doppelsummenkurve der spezifischen Schwebstofffracht und der Abflusspende (rechts) an der Messstelle Strombauleitung Aschach (Datengrundlage: viadonau und Verbund).....	29
Abbildung 25. Schwebstoffjahresfrachten (links oben), mittlere Jahresdurchflüsse (links unten) und Doppelsummenkurve der spezifischen Schwebstofffracht und der Abflusspende (rechts) an der Messstelle Linz (Datengrundlage: HZB, HZB, 1937; Bundesministerium für Handel und Wiederaufbau, 1956; Gruber, 1969; UNESCO, 1993; viadonau und Verbund). .....	30
Abbildung 26. Schwebstoffjahresfrachten (links oben), mittlere Jahresdurchflüsse (links unten) und Doppelsummenkurve der spezifischen Schwebstofffracht und der Abflusspende (rechts) an der Messstelle Abwinden-Asten (Datengrundlage: Nachtnebel et al., 2004; HZB; viadonau; Verbund). .....	30
Abbildung 27. Schwebstoffjahresfrachten (links oben), mittlere Jahresdurchflüsse (links unten) und Doppelsummenkurve der spezifischen Schwebstofffracht und der Abflusspende (rechts) an der Messstelle Ybbs-Persenbeug (Datengrundlage: Bundesministerium für Handel und Wiederaufbau, 1956; Gruber, 1969; 1973; Nachtnebel et al., 2004; HZB; viadonau; Verbund).....	31
Abbildung 28. Schwebstoffjahresfrachten (links oben), mittlere Jahresdurchflüsse (links unten) und Doppelsummenkurve der spezifischen Schwebstofffracht und der Abflusspende (rechts) an der Messstelle Stein-Krems (Datengrundlage: viadonau). .....	31
Abbildung 29. Schwebstoffjahresfrachten (links oben), mittlere Jahresdurchflüsse (links unten) und Doppelsummenkurve der spezifischen Schwebstofffracht und der Abflusspende (rechts) an den Messstellen Bad Deutsch-Altenburg (bis 2007) und Hainburg Straßenbrücke (ab 2008) (Datengrundlage: UNESCO, 1993; HZB, viadonau).....	32
Abbildung 30. Schwebstoffbilanz an der Donau und wichtigen österreichischen Zubringern (Datengrundlage: ehyd, viadonau, Verbund, DanubeSediment). .....	33
Abbildung 31. Abschätzung des Geschiebeeintrags aus den Nebenflüssen in die Donau vor größeren Regulierungen und Wasserkraftwerksbauten. Rote Zahlen aus Schmautz et al. (2000) und schwarze Zahlen aus Rosenauer (1947). .....	34
Abbildung 32. Anteil der Tages-, Ereignis (5 Tage) - und Monatsfrachten an der Gesamtjahresfracht von Durchfluss (blau), Schwebstoff (orange) und Geschiebe (grau) an den Messstellen Hainburg Straßenbrücke / Donau (Datengrundlage: Durchfluss und Schwebstoff: ehyd) (modifiziert nach Haimann et al., 2018). .....	36
Abbildung 33. Ganglinie der mittleren Schwebstoffkonzentration (rot) und des Durchflusses (blau) während des HW-Ereignisses im Juni 2013 an der Messstelle Hainburg Straßenbrücke an der Donau. Insert: Hystereseeffekt während des HW 2013 (Gmeiner et al. 2016; Datengrundlage: viadonau).....	37
Abbildung 34. Sedimentablagerung und Remobilisierung im Stauraum Aschach 1965 bis 2013 (Habersack et al. 2015; Datenbasis: Verbund 2014) .....	38
Abbildung 35. Komponenten der Sedimentbilanz an Beispiel des Rheins (Frings et al., 2014). .....	39
Abbildung 36. Links: Kumulierte Kubaturänderung im Stauraum Jochenstein zwischen 1981 und 2017. Rechts: Entwicklung der mittleren Sohlhöhe im Stauraum Jochenstein. Die roten Linien stellen die aktuelle Situation dar (Datengrundlage: viadonau). .....	39
Abbildung 37. Stauraumentwicklung hinsichtlich Anlandung und Erosion (100 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1981 bis 2017. Die graue Schattierung zeigt jene Volumenänderungen an, die im Untersuchungszeitraum stattgefunden haben. Die rote Linie stellt die Situation beim Vergleich der ersten mit der letzten verfügbaren Messung dar (Datengrundlage: viadonau).....	40
Abbildung 38. Links: Kumulierte Kubaturänderungen im Stauraum Aschach zwischen 1965 und 2016. Rechts: Entwicklung der mittleren Sohlhöhe. Die rote Linie symbolisiert die aktuelle Situation (Datengrundlage: Verbund und viadonau).....	41

Abbildung 39. Stauraumentwicklung hinsichtlich Anlandung und Erosion (100 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1965 bis 2016 (nach den Hochwasserereignissen von 2002 und 2013). Die graue Schattierung zeigt jene Volumenänderungen an, die im Untersuchungszeitraum stattgefunden haben. Die rote Linie stellt die Situation beim Vergleich der ersten mit der letzten verfügbaren Messung dar (Datengrundlage: Verbund und viadonau). .....	41
Abbildung 40. Kubaturänderungen (500 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge von 1965 bis 2016 (nach den Hochwasserereignissen von 2002 und 2013) – Sohlgrundaufnahme (Datengrundlage: Verbund und viadonau).....	42
Abbildung 41. Kubaturänderungen (500 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge von 1965 bis 2016 (nach Hochwasserereignissen von 2002 und 2013) – Sohlgrundaufnahmen budgetiert mit den Baggermengen (Datengrundlage: Verbund und viadonau). .....	42
Abbildung 42. Korngrößenverteilung der abgelagerten Sedimente im unteren Drittel des Stauraums Aschach (Kralik und Augustin-Gyurits, 1994). .....	42
Abbildung 43. Sedimentremobilisierung infolge der beiden Hochwasserereignisse im Jahr 2002. Rechts: Sedimentremobilisierung während des Hochwassers von 2013 (Datengrundlage: Verbund und viadonau).....	43
Abbildung 44. Sohlhöhenänderungen zweier Querprofile während der Hochwasserereignisse von 2002 und 2013. Rote Linie: Sohlhöhe nach den HW-Ereignissen im Jahr 2002. Dunkelblaue Linie: Sohlhöhe nach dem Hochwasser im Jahr 2013. ....	43
Abbildung 45. Stauraumentwicklung hinsichtlich Anlandung und Erosion (100 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1973 bis 2016 (nach den HW-Ereignissen von 2002 und 2013). Die graue Schattierung veranschaulicht die Kubaturänderungen, die im Untersuchungszeitraum stattgefunden haben. Die rote Linie zeigt die Situation beim Vergleich der ersten mit der letzten verfügbaren Messung (Datengrundlage: Verbund und viadonau).....	44
Abbildung 46. Links: Kumulierte Kubaturänderungen im Stauraum Ottensheim-Wilhering zwischen 1973 und 2016. Rechts: Entwicklung der mittleren Sohlhöhe im Stauraum Ottensheim-Wilhering zwischen 1973 und 2016. Die rote Linie zeigt die aktuelle Situation (Datengrundlage: Verbund und viadonau).....	45
Abbildung 47. Kubaturänderungen (100 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge direkt nach dem Hochwasser im August 2002 (linke Grafik) und zwei Jahre später (rechte Grafik). Die Darstellungen zeigen Anlandungsprozesse nach dem HW-Ereignis und die Remobilisierung und den Transport durch und zum Teil aus dem Stauraum in den darauffolgenden Jahren. Die rote Linie veranschaulicht die Situation beim Vergleich der Aufnahme vor dem HW mit der jeweiligen Aufnahme danach (Datengrundlage: Verbund und viadonau).....	45
Abbildung 48. Links: Kumulierte Kubaturänderungen im Stauraum Abwinden-Asten zwischen 1980 und 2017. Rechts: Entwicklung der mittleren Sohlhöhe im Stauraum Abwinden-Asten zwischen 1980 und 2017. Die rote Linie zeigt die aktuelle Situation (Datengrundlage: Verbund und viadonau).....	46
Abbildung 49. Stauraumentwicklung hinsichtlich Anlandung und Erosion (100 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1980 bis 2017 (nach den HW-Ereignissen von 2002 und 2013). Die graue Schattierung veranschaulicht die Kubaturänderungen, die im Untersuchungszeitraum stattgefunden haben. Die rote Linie zeigt die Situation beim Vergleich der ersten mit der letzten verfügbaren Messung (Datengrundlage: Verbund und viadonau).....	46
Abbildung 50. Kubaturänderungen (500 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1980 bis 2017 – Sohlgrundvermessung (nach den HW-Ereignissen 2002 und 2013) (Datengrundlage: Verbund und viadonau).....	47
Abbildung 51. Kubaturänderungen (500 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1980 bis 2017 – Sohlgrundvermessung inklusive Baggerkubatur (nach den HW-Ereignissen 2002 und 2013) (Datengrundlage: Verbund und viadonau). .....	47
Abbildung 52. Links: Kumulierte Kubaturänderung im Stauraum Wallsee-Mitterkirchen in den Jahren 1968 bis 2017. Rechts: Entwicklung der mittleren Sohlhöhe im Stauraum Wallsee-Mitterkirchen in den	

Jahren 1968 bis 2017. Die rote Linie repräsentiert die aktuelle Situation (Datengrundlage: Verbund und viadonau).....	48
Abbildung 53. Stauraumentwicklung hinsichtlich Anlandung und Erosion (100 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1968 bis 2017 (nach den HW-Ereignissen von 2002 und 2013). Die graue Schattierung zeigt die Kubaturänderungen, die im Untersuchungszeitraum stattgefunden haben. Die rote Linie repräsentiert die Situation beim Vergleich der ersten mit der letzten verfügbaren Aufnahme (Datengrundlage: Verbund und viadonau).....	49
Abbildung 54. Kubaturänderungen (500 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1968 bis 2017 – Sohlgrundvermessung (nach den HW-Ereignissen von 2002 und 2013) (Datengrundlage: Verbund und viadonau).....	49
Abbildung 55. Kubaturänderungen (500 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1968 bis 2017 – Sohlgrundvermessung inkl. Baggerkubaturen (nach den HW-Ereignissen von 2002 und 2013) (Datengrundlage: Verbund und viadonau).....	50
Abbildung 56. Stauraumentwicklung hinsichtlich Anlandung und Erosion über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1971 bis 2014. Die graue Schattierung zeigt die Kubaturänderungen, die im Untersuchungszeitraum aufgetreten sind. Die rote Linie repräsentiert die Situation beim Vergleich der ersten mit der letzten verfügbaren Aufnahme (Datengrundlage: Verbund).....	51
Abbildung 57. Links: Kumulierte Kubaturänderung im Stauraum Ybbs-Persenbeug in den Jahren 1966 bis 2014. Rechts: Entwicklung der mittleren Sohlhöhe im Stauraum Ybbs-Persenbeug zwischen 1966 und 2014. Die rote Linie zeigt die aktuelle Situation (Datengrundlage: Verbund).....	51
Abbildung 58. Links: Kumulierte Kubaturänderung im Stauraum Melk zwischen 1983 und 2014. Rechts: Entwicklung der mittleren Sohlhöhe im Stauraum Melk zwischen 1983 und 2014 (Datengrundlage: Verbund).....	52
Abbildung 59. Stauraumentwicklung hinsichtlich Anlandung und Erosion (100 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1983 bis 2014. Die graue Schattierung zeigt die Kubaturänderungen, die im Untersuchungszeitraum stattgefunden haben. Die rote Linie repräsentiert die Situation beim Vergleich der ersten mit der letzten verfügbaren Aufnahme (Datengrundlage: Verbund).....	52
Abbildung 60. Kubaturänderungen (500 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1983 bis 2014 – Sohlgrundvermessung (Datengrundlage: Verbund).....	53
Abbildung 61. Kubaturänderungen (500 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1983 bis 2014 – Sohlgrundvermessung inkl. Baggerkubaturen (Datengrundlage: Verbund).....	53
Abbildung 62. Links: Kumulierte Kubaturänderungen in der freien Fließstrecke Wachau zwischen 1984 und 2017 von Strom-km 2038 bis 2010. Rechts: Entwicklung der mittleren Sohlhöhe in der freien Fließstrecke Wachau zwischen 1984 und 2017. Die rote Linie repräsentiert die aktuelle Situation (Datengrundlage: viadonau).....	54
Abbildung 63. Entwicklung der mittleren Sohlhöhe in der Wachau (Strom-km 2038 bis 2010) bis 2017. Rote Punkte: Mittleres Sohlniveau unterhalb RNW-Anschlaglinie; blaue Punkte: Mittleres Sohlniveau unterhalb der MW-Anschlaglinie. Die schwarze Linie zeigt den Gesamttrend nach Glättung (Datengrundlage: viadonau).....	54
Abbildung 64. Oben: Entwicklung hinsichtlich Anlandung und Erosion (100 m Abschnitte) über die gesamte freie Fließstrecke von 1984 bis 2002 (links) bzw. von 2002 bis 2017 (rechts). Die rote Linie zeigt die Situation beim Vergleich der jeweiligen Messungen. Unten: Kumulierte Sohlspeicheränderung von 1984 bis 2002 (links) und 2002 bis 2017 (rechts) von Strom-km 2038 bis 2010. Dargestellt ist die Sohlspeicheränderung basierend auf den Sohlgrundaufnahmen, d.h. ohne Berücksichtigung der Baggerungen (Datengrundlage: viadonau).....	55
Abbildung 65. Links: Kumulierte Kubaturänderungen im Stauraum Altenwörth zwischen 1976 und 2013. Rechts: Entwicklung der mittleren Sohlhöhe im Stauraum Altenwörth zwischen 1976 und 2013. Die rote Linie zeigt die aktuelle Situation (Datengrundlage: Verbund).....	56



Abbildung 66. Stauraumentwicklung hinsichtlich Anlandung und Erosion (100 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge zwischen 1976 und 2013. Die graue Schattierung zeigt die Kubaturänderungen, die im Untersuchungszeitraum stattgefunden haben. Die rote Linie repräsentiert die Situation beim Vergleich der ersten mit der letzten verfügbaren Aufnahme (Datengrundlage: Verbund).....	57
Abbildung 67. Kubaturänderungen (500 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1976 bis 2013 – Sohlgrundvermessung (Datengrundlage: Verbund).....	57
Abbildung 68. Kubaturänderungen (500 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1976 bis 2013 – Sohlgrundvermessung inkl. Baggerkubaturen (Datengrundlage: Verbund). ....	57
Abbildung 69. Korngrößenverteilung im Längsverlauf des Stauraums (nach Summer und Nachtnebel, 1989).....	58
Abbildung 70. Stauraumentwicklung hinsichtlich Anlandung und Erosion (100 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1985 bis 2013. Die graue Schattierung zeigt die Kubaturänderungen, die im Untersuchungszeitraum stattgefunden haben. Die rote Linie repräsentiert die Situation beim Vergleich der ersten mit der letzten verfügbaren Aufnahme (Datengrundlage: Verbund).....	59
Abbildung 71. Links: Kumulierte Kubaturänderungen im Stauraum Greifenstein zwischen 1985 und 2017. Rechts: Entwicklung der mittleren Sohlhöhe im Stauraum Greifenstein zwischen 1985 und 2013. Die rote Linie zeigt die aktuelle Situation (Datengrundlage: Verbund).....	59
Abbildung 72. Links: Kumulierte Kubaturänderungen im Stauraum vor und nach KW-Errichtung Ende 1997. Rechts: Entwicklung der mittleren Sohlhöhe im Stauraum Freudenau zwischen 1998 und 2016. Die rote Linie zeigt die aktuelle Situation (Datengrundlage: Verbund).....	60
Abbildung 73. Stauraumentwicklung hinsichtlich Anlandung und Erosion (100 m Abschnitte) über die gesamte Stauraumlänge in den Jahren 1998 bis 2016 (nach Inbetriebnahme des Kraftwerks). Die graue Schattierung zeigt die Kubaturänderungen, die im Untersuchungszeitraum stattgefunden haben. Die rote Linie repräsentiert die Situation beim Vergleich der ersten mit der letzten verfügbaren Aufnahme (Datengrundlage: Verbund).....	61
Abbildung 74. Links: Kumulierte Kubaturänderungen zwischen dem KW Freudenau und der slowakischen Grenze (Strom-km 1920,6 – 1872,7) für die Perioden 2001 – 2005, 2001 – 2009 and 2001 – 2015 (Habersack et al., 2017). Rechts: Auswirkungen des Pilotprojekts Bad Deutsch-Altenburg auf die mittlere jährliche Sohlhöhenänderung für den Zeitraum 2009 – 2015 (Pessenlehner et al., 2016).....	63
Abbildung 75. Kumulierte Kubaturänderungen in der freien Fließstrecke östlich von Wien für den Zeitraum 1990 bis 2017. Rechts: Mittlere Sohlhöhenentwicklung östlich von Wien für den Zeitraum 1990 bis 2017. Die rote Linie zeigt die aktuelle Situation (Datengrundlage: viadonau).....	64
Abbildung 76. Sohlhöhenentwicklung östlich von Wien zwischen Strom-km 1920 – 1880 (ohne Grenzstrecke) bis 2017. Rote Punkte: Mittlere Sohlhöhe unterhalb RNW-Anschlagslinie; blaue Punkte: Mittlere Sohlhöhe unterhalb MW-Anschlagslinie. Die schwarze Linie zeigt den Gesamttrend nach Glättung.....	64
Abbildung 77. Kiesbaggerungen in der österreichischen Donau hinsichtlich deren Verwendung im Zeitraum 1936 bis 2016 (links in m <sup>3</sup> und rechts in %). ....	65
Abbildung 78. Menge an gebaggerten Kies (in %) in den beiden freien Fließstrecken Wachau und östlich Wien, hinsichtlich dessen Verwendung. Zeitraum zwischen 1971 und 2016 (Quelle: Donaukommission, Mühlbauer (2017), Schmautz et al. (2000), viadonau).....	66
Abbildung 79. Kieszugabe stromab des KW Freudenau im Zeitraum 1996 – 2017 (Datengrundlage: Verbund).....	67
Abbildung 80. Gebaggerte Kiesmenge in 5 km Abschnitten zwischen 1971 und 2016 (Quellen: Donaukommission, Mühlbauer (2017), Schmautz et al. (2000), Verbund, viadonau).....	67
Abbildung 81. Ablagerungsbereiche und -höhen im Bereich Mitterkirchen–Ardagger (Habersack et al., 2015; Datenbasis: LW-Kammer OÖ).....	68

Abbildung 82. Oben: Schwebstoffjahresfrachten an den Messstellen der österreichischen Donau: Maximum (2013; dunkelblau), Mittelwert 2001-2016 (grau) und Minimum (2003; mittelblau); senkrechte graue Linie: Lage der Messstellen (Datengrundlage: ehyd, viadonau, Verbund).....	72
Abbildung 83. Vorlandverlandung im Zeitraum 2001-2016: Hochwasserereignisse 2002 (rot) und 2013 (orange; zwei Berechnungsvarianten) entlang der österreichischen Donau: die Verlandungsvolumina wurden durch die zugehörige Flusslänge dividiert und in Kilometerabschnitten dargestellt (Datenquelle: BMLFUW. 2015).....	72
Abbildung 84. Kubaturänderungen im Zeitraum von Kraftwerkerrichtung (KW Jochenstein Aufnahmen erst ab 1981 verfügbar; KW Ybbs-Persenbeug Aufnahmen erst ab 1966; KW Freudenau noch nicht errichtet) bis 2001 an der österreichischen Donau. Oben: Erosion (blau) und Sedimentation (rot) basierend auf Sohlgrundvermessung. Mitte: gebaggerter (rot) sowie wiederverklappter, zugegebener oder in Kiesstrukturen eingebauter (blau) Kies. Unten: Kubaturänderung unter Berücksichtigung der Sohlgrundvermessung sowie Baggerungen, Wiederverklappungen und Zugabe (Datengrundlage: Verbund und viadonau).....	73
Abbildung 85. Kubaturänderungen im Zeitraum ab 2001 an der österreichischen Donau. Oben: Erosion (blau) und Sedimentation (rot) basierend auf Sohlgrundvermessung. Mitte: gebaggerter (rot) sowie wiederverklappter, zugegebener oder in Kiesstrukturen eingebauter (blau) Kies. Unten: Kubaturänderung unter Berücksichtigung der Sohlgrundvermessung sowie Baggerungen, Wiederverklappungen und Zugabe (Datengrundlage: Verbund und viadonau).....	74
Abbildung 86. Übersicht über Sedimentmanagementmaßnahmen (Habersack et al., 2019a).....	75
Abbildung 87. Links: Vegetation stabilisiert den Hang und vermindert den Oberflächenabfluss; Rechts: Strukturelle Störung von Hängen und mangelnde Vegetation erhöhen den Oberflächenabfluss und das Risiko von Massebewegungen .....	77
Abbildung 88. Siedlungsgebiet außerhalb (links) und innerhalb (rechts) des minimalen flussmorphologischen Raumbedarfs .....	78
Abbildung 89. Links: Öffnen eines HW-Schutzdammes zur Erhöhung der Retention; Rechts: Negatives Beispiel für eine geöffneten HW-Schutzdamm im Bereich eines Siedlungsgebietes.....	81
Abbildung 90. Oben: Entfernung von Uferrehnen - gesenkter Wasserstand bei bordvollem Durchfluss und verbesserte laterale Vernetzung zwischen Hauptstrom und Vorland; Unten: Uferrehne erhöht den bordvollen Wasserstand und reduziert das Abflussprofil .....	82
Abbildung 91. Links: Wiederhergestelltes Feuchtgebiet Rechts: Keine Feuchtgebiete infolge Entkoppelung Fluss und Umland.....	83
Abbildung 92. Furtbaggerung mit anschließender Wiederverklappung des gebaggerten Sediments im Fluss ...	85
Abbildung 93. Verlagerung der Fahrrinne anstelle von Fahrrinnenbaggerung zur Erhaltung der Mindestfahrwassertiefe .....	85
Abbildung 94. Oben: Rücknahme des Regulierungsgrades zur Reduktion der Sedimenttransportkapazität; Unten: Tiefenerosion infolge Regulierung .....	87
Abbildung 95. Belastungen im Zusammenhang mit dem Sedimentregime an der Donau und ausgewählten Nebenflüssen (basierend auf den Ergebnissen des DanubeSediment Berichts “Interactions of Key Drivers and Pressures on the Morphodynamics of the Danube”) (Habersack et al., 2019a).....	89
Abbildung 96. Vergleich der Breitenveränderung an der Donau: 20. Jahrhundert und aktuelle Situation (basierend auf den Ergebnissen des DanubeSediment Berichts “Long-term Morphological Development of the Danube in Relation to the Sediment Balance”). Die großen Breitenzunahmen an gewissen Stellen sind im aktuellen Zustand auf Stauräume zurückzuführen (Habersack et al., 2019b). .....	90
Abbildung 97. Oben links: Die Donau in Deutschland flussaufwärts von Donauwörth. Oben rechts: Grenzabschnitt zwischen Serbien und Kroatien bei Bezdan. Unten: Grenzabschnitt zwischen Rumänien und Bulgarien flussabwärts von Oltenita (basierend auf Daten erhoben für den DanubeSediment- Bericht " Long-term Morphological Development of the Danube in Relation to the Sediment Balance") (Habersack, et al., 2019b).....	91

Abbildung 98. Strecken an der Oberen, Mittleren und Unteren Donau mit Erosion und Anlandung  
 (basierend auf den Ergebnissen des DanubeSediment Berichts “Assessment of the Sediment Balance of  
 the Danube”) (Habersack et al., 2019a). ..... 92

Abbildung 99. Änderung des mittleren jährlichen Schwebstofftransports entlang der Donau:  
 Vergangenheit und Gegenwart. Der Pfeil zeigt eine Verringerung des Schwebstoffeintrags in das  
 Donaudelta und das Schwarze Meer um etwa 60 % an. Der Datenqualitätsindikator bezieht sich nur  
 auf die gegenwärtige Situation: data quality (high): gute Praktiken der Schwebstoffüberwachung, data  
 quality (moderate): weniger genaue Datensätze und Verbesserungen werden vorgeschlagen, data  
 quality (low): erhebliche Verbesserungen sind erforderlich (Abbildung und Einzelheiten zur  
 Datenqualität siehe DanubeSediment, 2019) (Habersack et al., 2019a). ..... 93

Abbildung 100. Änderung des mittleren jährlichen Geschiebetransports entlang der Donau: in der  
 Vergangenheit und in der Gegenwart. Der Pfeil zeigt eine Reduktion des Geschiebetransports in der  
 österreichischen Donau östlich von Wien um etwa 50% an. Der Datenqualitätsindikator bezieht sich  
 nur auf die gegenwärtige Situation: hohe Datenqualität: gute Praktiken des Geschiebemonitorings,  
 mäßige Datenqualität: weniger genaue Datensätze und Verbesserungen werden empfohlen. (aus dem  
 DanubeSediment Projektbericht " Sediment data analysis in the Danube River") (Habersack et al.,  
 2019a)..... 95

Abbildung 101. Baggerkubaturen unterteilt in Obere, Mittlere und Untere Donau (links) bzw. nach  
 Ländern (rechts) für zwei verschiedene Zeitperioden (II: 1971-1990 und III: 1991-2016). Für Kroatien  
 sind nur Baggerdaten für drei Jahre vorhanden..... 96

Abbildung 102. Änderung des mittleren Korndurchmessers  $D_{50}$  (Deckschicht) für drei Perioden (I: 1920-  
 1970; II: 1971-1990; III: 1991-2016) entlang der Donau zwischen Strom-km 2600-1000 (aus dem  
 DanubeSediment Projektbericht “Long-term Morphological Development of the Danube in Relation to  
 the Sediment Balance”) (Habersack et al., 2019a) ..... 97

Abbildung 103. Sedimentproben aus der Oberen, Mittleren und Unteren Donau im Zeitraum 1991-2016  
 (aus dem DanubeSediment Projektbericht “Long-term Morphological Development of the Danube in  
 Relation to the Sediment Balance”). ..... 98

Abbildung 104. Schwebstoffbilanz an der Donau und wichtigen Zubringern vor (links) und nach (rechts)  
 Kraftwerkserrichtung an der Donau (strichlierte Linien: Zubringer an denen keine Sedimentdaten  
 vorhanden sind bzw. die nicht mehr relevant sind für die Sedimentbilanz) (Habersack et al., 2019b)..... 100

Abbildung 105. Sediment balance alteration SWMI (aus Habersack et al., 2019b)..... 102

## 7.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Schwebstoffmessstellen an der österreichischen Donau..... 15

Tabelle 2. Schwebstoffmessstellen an Donauzubringern ..... 15

Tabelle 3. Informationen zum Schwebstoffmonitoring an der Donau und an den Zubringern..... 16

Tabelle 4. Historische und aktuelle Geschiebemesstellen an der österreichischen Donau. .... 22

Tabelle 5. Anlandungen im Vorland im Zuge der Hochwässer 2002 und 2013 (BMLFUW, 2015). ..... 69

Tabelle 6: Übersicht Sedimentmanagementmaßnahmen in Bezug auf den Hochwasserschutz..... 76

Tabelle 7: Übersicht Sedimentmanagementmaßnahmen in Bezug auf die Schifffahrt ..... 84