

Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Rhein
Vorstadt 74-76
55411 Bingen



Wasserstraßen- und
Schifffahrtsverwaltung
des Bundes

Anlage 18.1

Planfeststellungsverfahren gemäß §§ 12, 14 ff. Bundeswasserstraßengesetz

Vorhaben:

**Abladeoptimierung der Fahrrinnen am Mittelrhein
Teilabschnitt 3, „Jungferngrund“ und „Geisenrücken“
Rhein-km 547,50 bis 557,00**

und

Vorhaben:

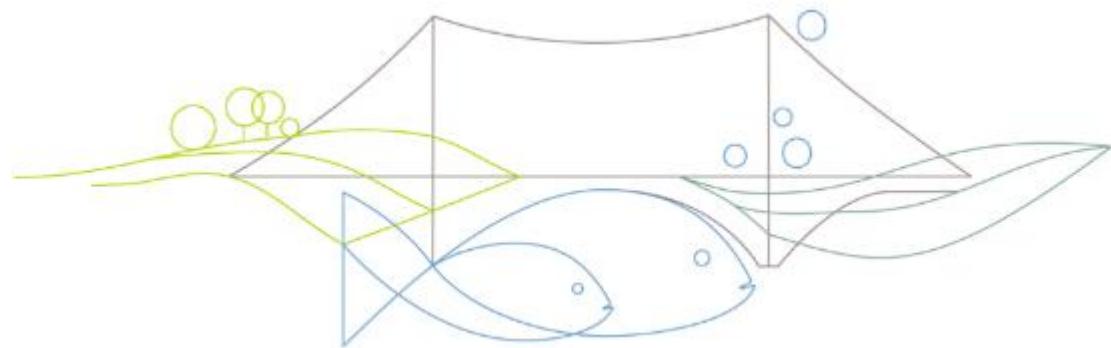
Ufermodellierung am Tauber Werth

Dokumentation des Messprogramms - Feststoffüberwachung

Anlage zu 0203.02.03.01#00006#0003

Dokumentation des Messprogramms, seiner Durchführung und der Ergebnisse, hier Feststoffüberwachung für einen Baggerversuch im Fels

Dr. Axel Winterscheid; Dr. Thomas Hoffmann; Dr. Gudrun Hillebrand; Wilfried Otto; Yannik Baulig, Dr. Felix Op de Hipt
(alle Referat M3)



Anlage zu 0203.02.03.01#00006#0003

Dokumentation des Messprogramms, seiner Durchführung und der Ergebnisse, hier Feststoffüberwachung für einen Baggerversuch im Fels

Dr. Axel Winterscheid; Dr. Thomas Hoffmann; Dr. Gudrun Hillebrand; Wilfried Otto; Yannik Baulig, Dr. Felix Op de Hipt
(alle Referat M3)

Auftraggeber: Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Rhein

SAP-Nummer: M39610304092

Datum: 17.07.2025

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	3
1 Veranlassung	4
2 Untersuchungskonzept	6
3 Schwebstoffverhältnisse des Rheinabschnittes als Rahmenbedingung der Versuche	8
3.1 Methodische Grundlagen zum Schwebstoffmonitoring.....	8
3.2 Schwebstoffverhältnisse an der Messstelle St.Goar.....	9
4 Messungen auf der Baggereinheit.....	13
4.1 Messkonzept und -ablauf	13
4.2 Ergebnisse	15
4.2.1 Geisenrücken (Rhein-km: 552,040 – 552,220).....	15
4.2.2 Lorchhausener Grund (Rhein-km: 541,440 – 541,730).....	17
4.3 Zwischenfazit	18
5 Schwebstoffkonzentrationen im Querprofil oberhalb und unterhalb der Baggerversuche...	19
5.1 Messkonzept und -ablauf	20
5.2 Ergebnisse	21
5.2.1 Teststrecke Geisenrücken	22
5.2.2 Teststrecke Lorchhausener Grund	22
5.3 Zwischenfazit	23
6 Dauermessungen an Station St. Goar.....	24
6.1 Zwischenfazit	27
7 Schlussfolgerungen.....	29
Verzeichnisse.....	31
Abbildungsverzeichnis	31
Tabellenverzeichnis.....	32
Literaturverzeichnis.....	32
Anhang A	33

1 Veranlassung

Im Zeitraum von Mai bis Juli 2022 ist in den Teilabschnitten des Mittelrheins bei Lorch / Niederheimbach (Rhein-km 541,4 - 541,8) und stromabwärts von Oberwesel (Rhein-km 552,0 – 552,3) im Auftrag des Wasserstraßen- und Schifffahrtsamtes Rhein (WSA Rhein) ein Baggerversuch im Fels durchgeführt worden. Diese Baumaßnahme steht im Zusammenhang mit dem Projekt „Abladeoptimierung der Fahrrinnen am Mittelrhein (AOMR)“, für das das WSA Rhein derzeit die Unterlagen für ein Genehmigungsverfahren ausarbeitet. Ziel dieses Versuches war es, ein Bauverfahren festzulegen, mit dem der Sohlabtrag zielsicher und unter Berücksichtigung wirtschaftlicher, naturschutzfachlicher sowie planrechtlicher Aspekte umgesetzt werden kann. Von einem Ponton aus wurden felsige Bereiche des Gewässerbetts mit einem Hydraulikbagger bearbeitet. Dieser Bagger war mit einer speziellen Fräse ausgestattet, um das dort anstehende Schiefergestein abzutragen. Bei diesem Verfahren handelte es sich um eine Erprobung und Optimierung eines Verfahrens, mit dem Fels unter Wasser präzise und erschütterungsarm abgetragen werden soll. Die Erkenntnisse aus dem Baggerversuch sollen dazu beitragen, ein umweltverträgliches und wirtschaftliches Bauverfahren für notwendige Arbeiten an felsiger Sohle anwendungsreif zu machen. Neben den baulichen und gerätetechnischen Aspekten beim getesteten Verfahren wurden auch mögliche Auswirkungen auf die Umwelt überwacht und dokumentiert.

Im Rahmen des Baggerversuchs sind neben der bauausführenden Firma Hülskens Wasserbau GmbH & Co. KG weitere Unternehmen beteiligt: SeaTerra GmbH, Kreidemacher Ingenieure, BCE Björnsen Beratende Ingenieure und das Ingenieur Team Geo GmbH. Zusätzlich wird das WSA Rhein bei den Planungen und der Durchführung des Baggerversuchs von den Bundesanstalten für Wasserbau (BAW) und Gewässerkunde (BfG) begleitet und beraten.

Die Ergebnisse dieses Baggerversuchs sollen in Form eines Abschlussberichts und unter der Federführung des WSA Rhein zusammengefasst und damit dokumentiert werden. Die an der Begleitung des Baggerversuchs beteiligten Fachdisziplinen erstellen jeweils separate Teilberichte, welche dann die Grundlage für die Erstellung des Abschlussberichts ergeben. Dem Abschlussbericht können dann alle Details und Einzelheiten zur Konzeption, Durchführung und Ergebnissen des Baggerversuchs entnommen werden.

Die BfG hat diesen Baggerversuch mit mehreren Fachreferaten unterstützt. Der Auftrag an das Referat M3 „Gewässermorphologie, Sedimentdynamik und -management“ umfasste die Messung und Beurteilung der Trübung und der damit korrespondierenden Feststoff- bzw. Schwebstoffgehalte, welche beim Lösen und Laden des Baggerguts sowie infolge des Einleitens des Prozesswassers in den Rhein initiiert werden können. Vor Einleitung in den Rhein wurde das Prozesswasser an Bord der Baggereinheit in mehreren Stufen von Feststoffanteilen gereinigt. Die Messungen wurden sowohl auf der Baggereinheit als auch im Gewässer durchgeführt.

Als Beitrag für den Abschlussbericht ist diese Unterlage entsprechend des Messkonzepts in vier Teilkapitel gegliedert: zu den Schwebstoffverhältnissen im Rhein als Rahmenbedingung der Baggerversuche, den Messungen auf der Baggereinheit, den zusätzlichen schiffsgestützten Messungen im Bereich der Baggerversuche sowie der Auswertung der Schwebstoffdauermessstelle in St. Goar im Kontext der Baggerversuche. In diesen Teilkapiteln werden sowohl das zur Begleitung der Baggerversuche entwickelte Untersuchungskonzept als auch die erzielten Messdaten und darauf basierend die Beurteilung möglicher Auswirkungen der Baggerversuche auf die Schwebstoffverhältnisse beschrieben.

Hinweis: Die Textabschnitte, welche den Baggerversuch und seine Zielsetzung beschreiben, wurden sinngemäß der Pressemitteilung und der Broschüre zum Baggerversuch entnommen. Die Quellen können eingesehen werden unter: https://www.abladeoptimierung-mittelrhein.wsv.de/Webs/Projektseite/Mittelrheinoptimierung/DE/01_Startseite/startseite_node.html
(letzter Zugriff am 13.06.2023)

2 Untersuchungskonzept

Für die Überwachung und Beurteilung der Trübung und der damit korrespondierenden Feststoff- bzw. Schwebstoffgehalte, die sowohl beim Lösen und Laden des Baggerguts als auch durch die Rückführung des Prozesswassers entstehen, wurden Messungen an verschiedenen Standorten durchgeführt. Die verschiedenen Bestandteile des Messkonzepts sind aufeinander abgestimmt und können zur Überprüfung der jeweils anderen Messergebnisse genutzt werden. Alle Messungen wurden auf korrespondierende Feststoff- bzw. Schwebstoffgehalte kalibriert, so dass eine Bilanzierung und der Vergleich von Mengen möglich sind.

Der erste Messstandort war die Baggereinheit selbst. Die hier im Prozesswasser erfassten Mengen werden nachfolgend als Feststoff bezeichnet. Die Ergebnisse sind in Kapitel 4 dargestellt. Mit diesen Messdaten konnten die folgenden Fragestellungen untersucht werden:

- 1) Welche Trübung bzw. welcher Feststoff-/Schwebstoffgehalt geht von der Baggereinheit aus? Im Schwerpunkt der Messungen stand vor allem das Prozesswasser, welches nach einer mehrstufigen Reinigung an Bord der Einheit wieder zurück in den Rhein geleitet wurde.
- 2) Wie effektiv sind die hintereinander geschalteten Reinigungsstufen? Durch Anordnung von Messsonden vor und nach der Stufe der Zentrifugen kann im Nachgang zum Baggerversuch die Reinigungsleistung dieser Stufe beurteilt werden.

Der fachliche Schwerpunkt der BfG/M3 lag bei der ersten Fragestellung und nicht in der technischen Beurteilung der beim Baggerversuch eingesetzten Gerätschaften. Diese Aufgabe obliegt dem WSA Rhein. Die BfG/M3 stellt hierzu unterstützend Messdaten mit einer Ersteinschätzung zur Verfügung. Des Weiteren wurden während des Baggerversuchs Messdaten an Bord zur Überwachung des Prozesswassers und der mit diesem verbundenen feinkörnigen Feststoffemissionen genutzt. Es wurde eine Alarmfunktion eingerichtet, um vor der Einleitung vor hohen Feststoffgehalten im Prozesswasser zu warnen.

Die Messungen auf der Baggereinheit werden zudem durch schiffsgestützte ADCP-Messkampagnen in beiden Testgebieten (Lorchhausener Grund und Nebenarm Geisenrücken) ergänzt (siehe Kapitel 5). Hierzu wurden versuchsbegleitend an mehreren Messtagen Querprofilfahrten stromauf und stromab der Baggereinheit durchgeführt. Sofern messtechnisch erfassbar, können damit Feststoffemissionen infolge der Einleitung des Prozesswasser oder sohnah am eingehausten Kopf der Fräse erfasst werden. Durch Messfahrten an mehreren Querprofilen stromab der Einheit können ebenfalls Aussagen über die Ausbreitung und die Durchmischung der feinkörnigen ($< 63 \mu\text{m}$) Feststoffemissionen mit natürlichem Schwebstoff gemacht werden. Hieraus resultiert ein erhöhter Gesamtschwebstoffgehalt stromab der Baggereinheit. Am Profil stromauf der Baggereinheit wurden die Referenzverhältnisse für den natürlichen Schwebstoffgehalt erfasst.

Der dritte Bestandteil des Untersuchungskonzepts sind Schwebstoffdauermessungen an der Station St. Goar (siehe Kapitel 6). Diese Station ist Bestandteil des Schwebstoffdauermessnetzes, das die WSV in Kooperation mit der BfG betreibt. Ziel der Auswertungen dieser Daten ist der Ausschluss einer messtechnisch nachweisbaren Erhöhung der Schwebstoffverhältnisse des Rheins im weiteren Flussverlauf infolge des Baggerversuchs. Zugleich ergeben die an der Station St. Goar erhobenen Daten eine langfristige Referenz für die natürlichen Schwebstoffgehalte (siehe Kapitel 3).

Übergreifend soll mit dem Baggerversuch der Nachweis geführt werden, dass dieser ohne eine messbare Verschlechterung der Gewässergüte möglich ist. Eine umweltrechtliche Ersteinschätzung erfolgt nicht. Für die Erstellung der zukünftigen Verfahrensunterlagen umfasst dieser Teilbericht eine Beurteilung auf Basis von Messdaten, ob und in welchem Umfang eine im Rhein messbare Erhöhung des Gesamtschwebstoffgehalts infolge der Baggerung festgestellt werden konnte.

3 Schwebstoffverhältnisse des Rheinabschnittes als Rahmenbedingung der Versuche

3.1 Methodische Grundlagen zum Schwebstoffmonitoring

Zur Erfassung des Sedimenttransports in den Bundeswasserstraßen betreibt die WSV ein Geschiebe- und Schwebstoffmessnetz. Die Konzeptionierung der Messnetze und die Analyse und Auswertung der Monitoringdaten erfolgt durch die BfG/M3. Die Schwebstoffdauermessstelle St. Goar (Rhein-km 557) existiert seit November 1970. Hier erfolgt die Bestimmung der Schwebstoffkonzentration durch die werktägliche Entnahme einer 5 l Wasserprobe in Flussmitte und an der Gewässeroberfläche (Einpunktmessung) und anschließender Filtrierung vor Ort. Für den Abfluss, welcher bei weiterführenden Analysen und bei der Berechnung von Schwebstofffrachten verwendet wird, werden die Daten des Pegels Kaub bei Rheinkilometer 546,23 genutzt.

Das Messnetz wird entsprechend den Ergebnissen einer BfG-Pilotstudie seit 2009 kontinuierlich auf automatisch messende Trübungssonden nach ISO 7072 Standard umgestellt. Die Umstellung auf die Messung mittels Trübungssensor erfolgte bei der Messstelle in St. Goar am 08.12.2021. Die Trübungssonde, die sich am rechten Ufer befindet, ermittelt die mittlere Trübung an der Messstelle in einem 15-Minuten Intervall. Auf Basis der Trübungszeitreihe wird eine plausibilisierte Zeitreihe erstellt, welche auch in einem weiteren Schritt zur Berechnung der korrespondierenden Schwebstoffkonzentrationen Verwendung findet. Der Prozess der Plausibilisierung basiert auf einem speziell für das Messnetz entwickelten Algorithmus und beinhaltet eine Detektion von Ausreißern sowie einer anschließenden Glättung der zuvor bereinigten Zeitreihe

Die Trübung im Gewässer ist nicht allein von der Schwebstoffkonzentration abhängig. Zur Qualitätssicherung der Messwerte und einer Umrechnung der Trübungszeitreihe in eine Schwebstoffkonzentration in mg/l ist daher die Entnahme von Proben zur Kalibrierung notwendig. Diese werden wöchentlich in Form von 2 x 1 l Wasserproben in unmittelbarer Nähe der Trübungssonden genommen. Die Schwebstoffkonzentrationen dieser Wasserproben werden im M3-Sedimentlabor der BfG durch Filtration mit Membran-Filter der Marke Sartorius aus Celluloseacetat mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Porengröße von 0,45 µm ermittelt und weisen Genauigkeiten von 2 mg/l auf. Die Kalibrierung erfolgt stationsweise über spezifisch angepasste Regressionsbeziehungen. Unsicherheiten, die sich aus der Regressionsanalyse ergeben, werden in Form von Konfidenzintervallen der Schwebstoffkonzentration angegeben.

Für die Auswertung der Messtelle St. Goar wurde eine Kalibrierung mit allen zur Verfügung stehenden Proben vorgenommen. Zum Zeitpunkt der Bearbeitung waren seit Start der umgerüsteten

Messstelle 50 Proben verfügbar. Nach einer Mittelwertbildung von Doppelproben und der Entfernung eines Ausreißers konnten insgesamt 30 der 50 Proben zur Kalibrierung herangezogen werden.

Für die Kalibrierung werden Datenpaare aus Kalibrierproben in mg/l und einem auf den Zeitpunkt der Probe interpolierten plausibilisierten Trübungswert (FNU, Formazine Nephelometric Units) verwendet (siehe Abbildung 1). Die Kalibrierung basiert auf einer Regression der Form ax^b und beruht auf einer log-linearen Transformation. Mit einer Resampling-Methode (Bootstrap) werden wiederholt zufällige Stichproben genommen, um im Anschluss Konfidenzintervalle der Koeffizienten berechnen zu können. Die Koeffizienten a und b werden somit 1000-mal mittels der oben beschriebenen Methode berechnet, die Spannweite und Kalibrierkurven sind ebenfalls in Abbildung 1 dargestellt.

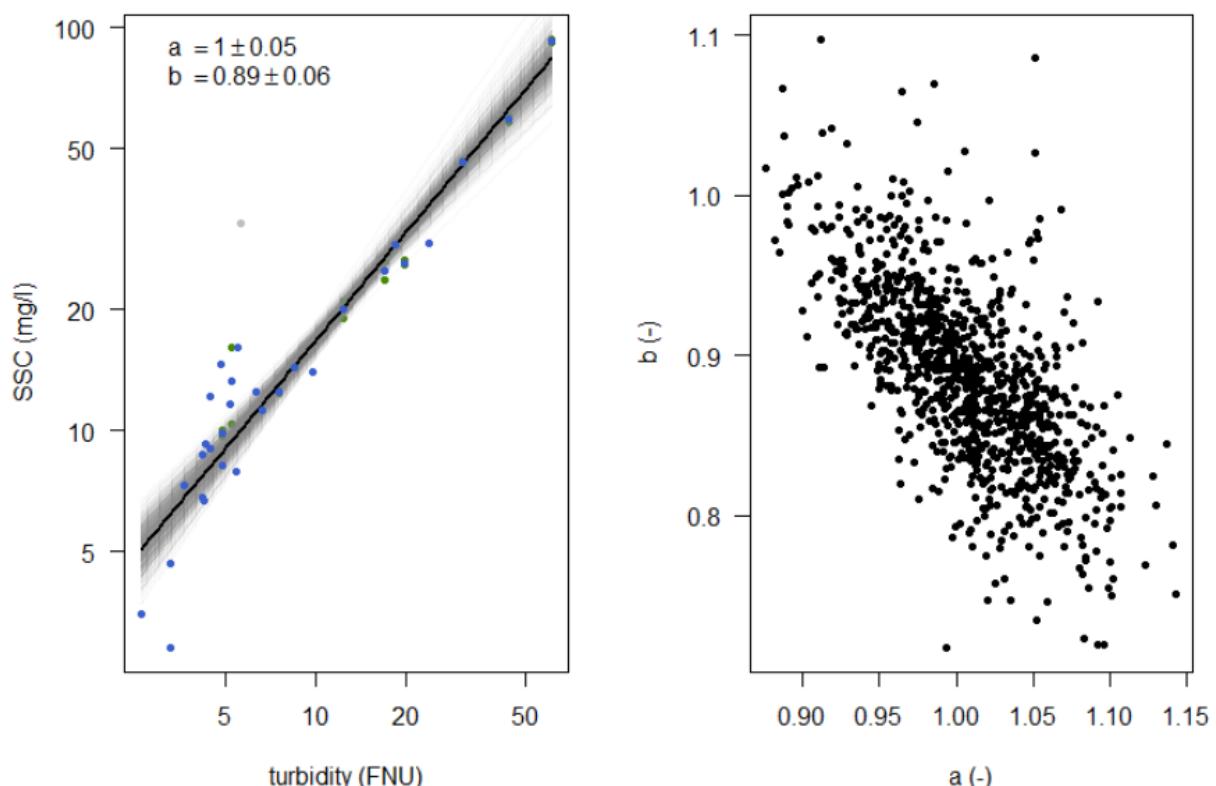


Abbildung 1: Kalibrierkurve (schwarz) und Schwankungsbereich auf Basis des Bootstrap-Verfahrens. Die blauen Datenpaare wurde für die Kalibrierung verwendet, grüne Punkte stellen einzelne Doppelproben und graue Punkte Ausreißer dar. Die rechte Graphik zeigt die Verteilung der a und b Koeffizienten.

3.2 Schwebstoffverhältnisse an der Messstelle St.Goar

Zwischen dem 01.11.1970 und dem 28.02.2022 (letzter aktuell verfügbarer Wert „altes“ Schwebstoffmessnetz) lag die Schwebstoffkonzentration bei werktäglicher Probenahme im Mittel bei 25 mg/l (Tabelle 1 und Abbildung 2). Der insgesamt höchste Wert von 668 mg/l wurde am 28.03.2001 erreicht. Innerhalb der letzten drei Jahre betrug die mittlere Schwebstoffkonzentration 15,9 mg/l (28.02.2019 – 28.02.2022) mit einem Höchstwert von 142,5 mg/l am 05.02.2022. Seit der Umstellung

der Messstelle St. Goar auf die Schwebstoffmessung mittels Trübungssensor am 08.12.2021 liegt die Trübung bis zum 17.01.2023 im Mittel bei 9,8 FNU, was nach Kalibrierung einer korrespondierenden Schwebstoffkonzentration (SSC) von 15,7 mg/l entspricht. Die höchsten Werte liegen bei 125,7 FNU bzw. 159,6 mg/l und wurden am 06.01.2022 um 20:45 Uhr erreicht.

Tabelle 1: Daten der Messstelle St. Goar (alte und neue Methode) für verschiedene Zeitspannen und seit Beginn der Datenerhebung.

Zeitspanne	Trübung (FNU)		SSC (mg/l)	
	Mittel	Max	Mittel	Max
Langjährig (01.11.1970 – 28.02.2022)			25	668
Letzte drei Jahre (28.02.2019 – 28.02.2022)			15,9	142,5
Vor Baggerversuch (23.03.2022 – 18.05.2022)	7,6	70,5	12,5	95,3
Während Baggerversuch (18.05.2022 – 13.07.2022)	4,7	9,2	8,5	15,6
Nach Baggerversuch (13.07.2022 – 10.08.2022)	4,4	6,6	8,1	11,5

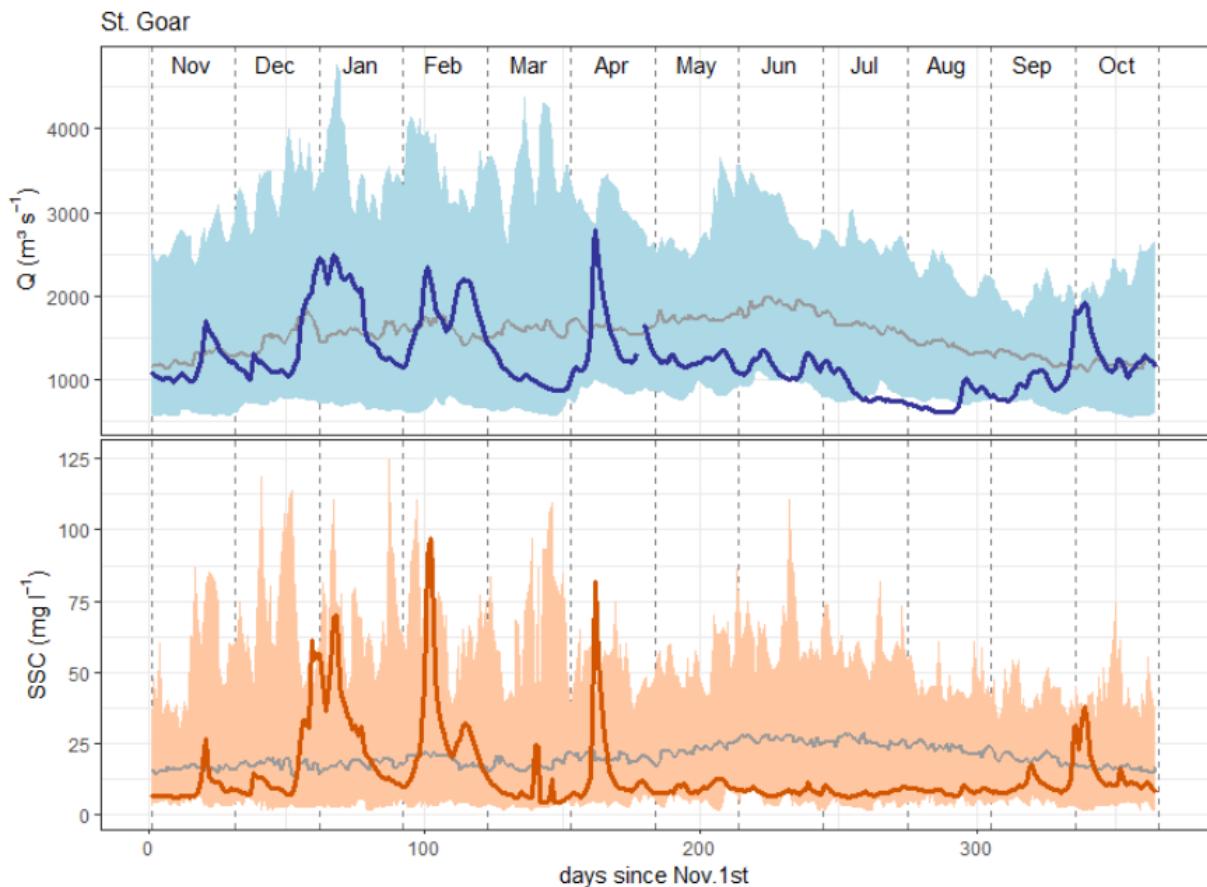


Abbildung 2: Jahresgang von Abfluss und Schwebstoffkonzentration des Referenzpegels Kaub und der Messstelle in St. Goar, basierend auf den Daten zwischen 1970 und 2022. Die Farbbänder markieren das Intervall zwischen dem 2% und 98%-Quantil. Die grauen Linien kennzeichnen die langjährigen Mittelwerte. Die blaue und braune Linie geben den Jahresgang 2022 wieder.

Abfluss und Schwebstoffkonzentration weisen im langjährigen Mittel einen ausgeprägten saisonalen Gang auf. Maximale Abflüsse und Schwebstoffkonzentrationen werden meist zwischen Januar und März erreicht, im langjährigen Mittel werden die höchsten Abflüsse und Konzentrationen im Juni beobachtet. Das hydrologische Jahr 2022 zeigt ausgeprägte Hochwässer mit Abfluss- und Konzentrationsspitzen in den Monaten Dezember/Januar, Februar und April. Von April bis August 2022 nehmen die Abflüsse mehr oder weniger kontinuierlich ab, bei ausgeprägt geringen Schwebstoffkonzentrationen. Während des Baggerversuchs zwischen dem 18.05.2022 und dem 13.07.2022 liegt die Trübung im Mittel bei 4,7 FNU, was einer berechneten Schwebstoffkonzentration (SSC) von 8,5 mg/l entspricht (siehe Abbildung 1). Die höchsten Werte liegen bei 9,2 FNU bzw. 15,6 mg/l und wurden am 27.06.2022 08:45 Uhr erreicht. Die während der sechswöchigen Baggerphase beobachteten Werte liegen unterhalb der längerfristigen Mittelwerte. Der höchste von der Trübungssonde erfasste Wert, welcher zugleich in einen Zeitraum mit laufenden Baggerarbeiten am Tag fällt, entspricht etwa der mittleren Schwebstoffkonzentration der letzten drei Jahre (vgl. Tabelle 1).

Insgesamt können die natürlichen Schwebstoffverhältnisse, die während des gesamten Baggerversuchs angetroffen worden sind, im langjährigen Vergleich als unterdurchschnittlich gering eingestuft werden. Für das Ergebnis dieser Untersuchungen bedeuten geringe Hintergrundkonzentrationen an

Schwebstoff, dass das Signal der Feststoffemissionen infolge der Einleitung des Prozesswassers bestmöglich zu detektieren ist. Gelingt der Nachweis unter diesen (aus Messsicht optimalen) Bedingungen nicht, kann dann in Zukunft bei vergleichbaren oder höheren Hintergrundkonzentrationen für den Schwebstoff ein messtechnischer Nachweis ausgeschlossen werden. Das relative Änderungssignal wäre stets schwächer und damit aus Sicht der Messtechnik noch schwieriger nachzuweisen.

4 Messungen auf der Baggereinheit

4.1 Messkonzept und -ablauf

Für die Überwachung der Feststoffkonzentrationen wurde ein auf Trübungsdaten und Wasserproben basierendes Mess- und Alarmierungskonzept entwickelt. Ziel war es neben einer Echtzeitüberwachung der Trübung, die gemessenen Daten kontinuierlich und in einer hohen zeitlichen Auflösung aufzuzeichnen. Es wurden auf der Baggereinheit zwei Messpunkte festgelegt (s. Abbildung 3):

1. Messung im Unterlauftank vor den Zentrifugen (Position 1 in Abbildung 3)

Der erste Messpunkt wurde im Unterlauftank zwischen den Einlassrohren der Hydrozyklone installiert. Ziel war es, die Feststoffkonzentration vor der Zentrifugierung zu bestimmen, um die Abscheideeffizienz der Zentrifugen einzuschätzen.

2. Messung am Auslass (Position 2 in Abbildung 3)

Der zweite Messpunkt wurde im Auslassrohr installiert. Ziel der Messungen war es, die Konzentration der eingeleiteten (feinkörnigen) Feststoffe im Prozesswasser nach den verschiedenen Klärungsstufen zu bestimmen.

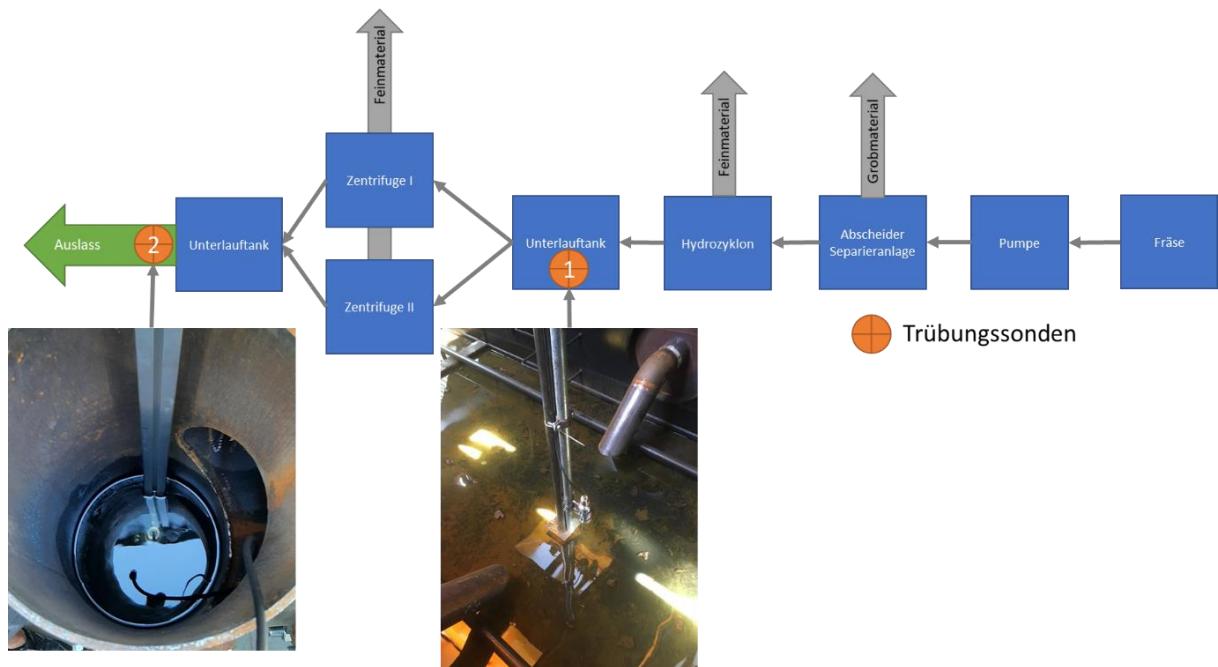


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Baggereinheit mit Fotos der Messstellen der Trübungssonden

Trübungssonde

Für die Überwachung und Messung der Trübung im Prozesswasser wurde die Trübungssonde Solitax ts-line sc der Firma Hach Lange GmbH genutzt. Die Sonde erfasst die Trübung über ein optisches Rückstreuignal und gibt sie in der Einheit FNU aus.

Datenlogger

Die Daten der Sonde wurden in einem Zeitintervall von einer Minute auf einem Datenlogger der Firma Ott Hydromet GmbH (Ott NetDL500) gespeichert.

Alarmierung und Echtzeitüberwachung

Im Datenlogger wurden Trübungsgrenzwerte (2177 FNU) hinterlegt, bei deren Überschreitung ein akustisch-optischer Alarm ausgelöst wurde. Dadurch wurde eine unmittelbare Reaktion auf eine nicht tolerierbare Einleitung von Feststoffen ermöglicht. Zusätzlich wurde die Entwicklung der Trübung in Echtzeit graphisch dargestellt. Der Trübungsgrenzwert wurde vorab überschlägig so festgelegt, dass ein messtechnischer Nachweis eines infolge der Einleitung des Prozesswassers erhöhten Schwebstoffgehaltes an der stromab gelegenen Messstation St. Goar (siehe Kapitel 6) sicher ausgeschlossen werden kann. Mit den nun vorliegenden Messdaten kann ein zukünftiger Grenzwert genauer festgelegt werden.

Kalibrationsproben

Zur Kalibration der Trübungsdaten wurden in unmittelbarer Nähe zu den Trübungssonden Proben des Prozesswassers in unterschiedlichen Zeitabständen gezogen. Diese Proben wurden im Sedimentlabor der BfG/M3 analysiert. Anhand der ermittelten Probeneigenschaften (Volumen, Feststoffgehalt) wurde die zu einem Trübungswert korrespondierende Feststoffkonzentration bestimmt.

Kalibration – Berechnung der Feststoffkonzentrationen und -frachten

Mithilfe der Zeitstempel, die mit jeder Wasserprobe aufgezeichnet wurden, konnten die Feststoffkonzentrationen entsprechenden Trübungswerten zum identischen Zeitpunkt zugeordnet werden. Mit diesen Datenpaaren wurde über eine lineare Regressionsanalyse eine Regressionsgleichung ermittelt, die dann zur Umrechnung der kontinuierlichen Trübungsdaten in Feststoffkonzentrationen genutzt wurde.

Abbildung 4 zeigt die Regressionsgeraden mit entsprechenden Gleichungen, Bestimmtheitsmaßen, Probenanzahlen und 95 %-Konfidenzintervallen. Die Kalibration an den beiden Messpunkten auf der Baggereinheit wurde für die Teststrecken Geisenrücken und Lorchhausener Grund jeweils neu festgelegt.

Die Feststofffrachten wurden mit Hilfe der Pumpleistung von 200 m³/h bzw. 0,056 m³/s berechnet. Dieser Wert stellt ein Maximum dar, bei dem angenommen wird, dass die Pumpe stets bei maximaler Leistung betrieben wurde.

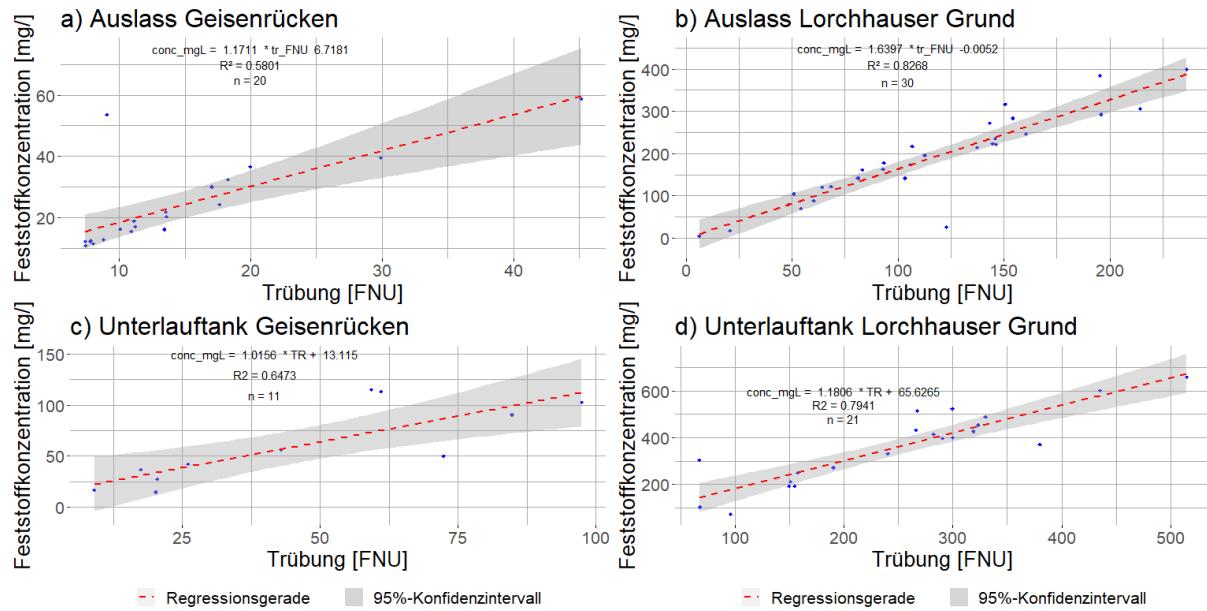


Abbildung 4: Streudiagramme und resultierende Regressionsgleichungen mit 95 %-Konfidenzintervall für den Auslass am Geisenrücken und (a) für den Lorchhausener Grund (b) sowie für den Unterlauftank am Geisenrücken (c) und Lorchhausener Grund (d). conc_mg entspricht der Konzentration in mg/l, tr_FNU der gemessenen Trübung in FNU, R² dem Bestimmtheitsmaß und n der Stichprobengröße

4.2 Ergebnisse

4.2.1 Geisenrücken (Rhein-km: 552,040 – 552,220)

Abbildung 5 zeigt die berechneten täglichen Feststofffrachten an der Teststrecke Geisenrücken am Auslass und im Unterlauftank vor der Zentrifugierung. Für den Auslass liegen die maximalen Tagesfrachten in der Spannweite zwischen 74 und 120 kg/d. Über den gemessenen Zeitraum (20 Tage) wurden ca. 0,74 t Feststoff am Auslass eingeleitet. Die mittlere und maximale Feststoffkonzentration im Prozesswasser lag bei 24 mg/l und 176 mg/l.

Die maximalen Frachten liegen im Unterlauftank zwischen 0,126 und 0,290 t/d. Die Summe über den gesamten Messzeitraum beträgt ca. 1,6 t.

Die Differenz über den gesamten Messzeitraum zwischen den Frachten vor und nach der Zentrifugierung beträgt ca. 0,86 t. Somit wurden ca. 54 % der Feststofffracht durch die Zentrifugierung und die Sedimentation im Unterlauftank aus dem Prozesswasser vor Einleitung entfernt.

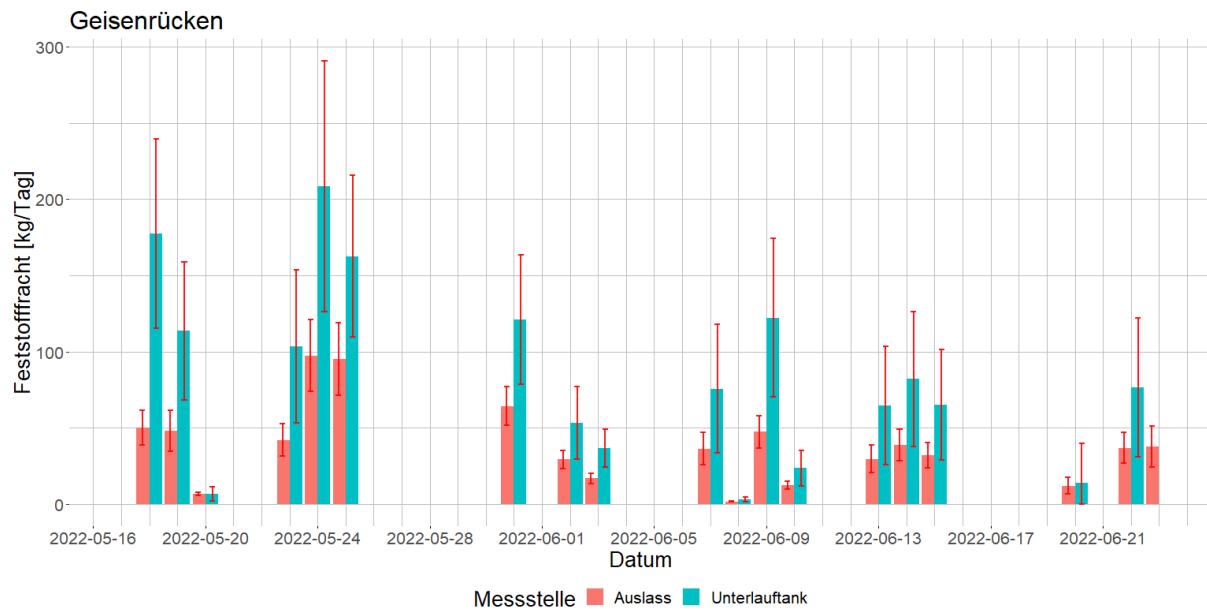


Abbildung 5: Tägliche Feststofffrachten in kg/d an der Teststrecke Geisenrücken für den Auslass (rot) und den Unterlauftank (blau). Die Fehlerbalken entsprechen dem 95 %-Konfidenzintervall.

Abbildung 6 zeigt die maximalen täglichen Konzentrationen im Vergleich zum festgelegten Grenzwert von 2500 mg/l bzw. 2177 FNU. Die Abbildung verdeutlicht, dass die gemessenen Trübungswerte deutlich unterhalb des festgelegten Grenzwerts lagen.

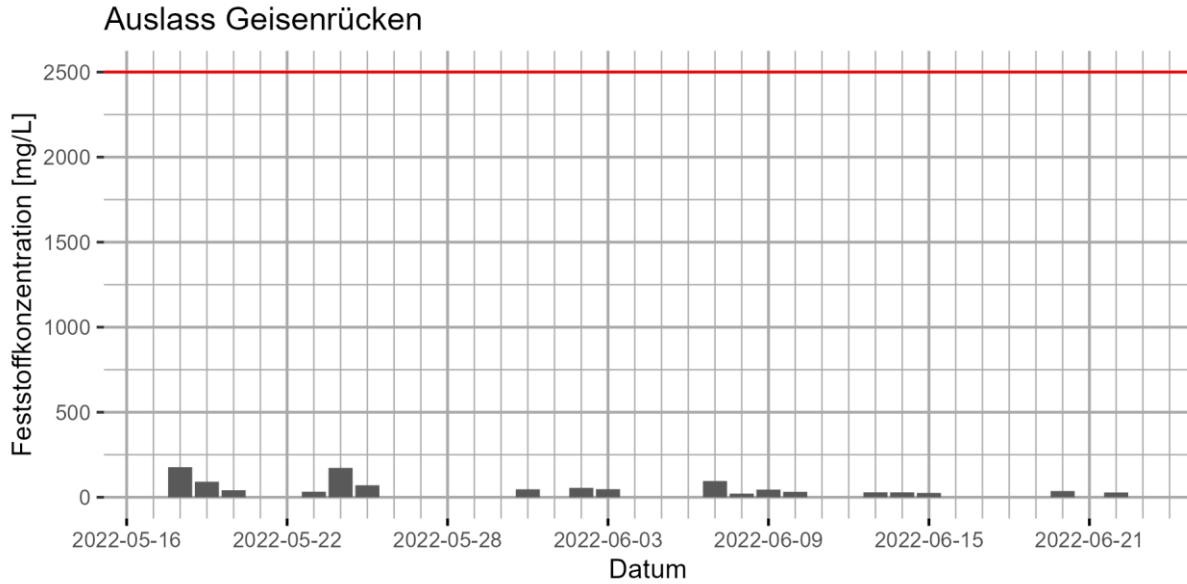


Abbildung 6: Maximale tägliche Feststoffkonzentrationen am Auslass der Teststrecke Geisenrücken und der festgelegte Alarmwert als rote Linie

4.2.2 Lorchhausener Grund (Rhein-km: 541,440 – 541,730)

Abbildung 7 zeigt die berechneten Tagesfrachten am Auslass und im Unterlauftank an der Teststrecke Lorchhausener Grund. Am Auslass liegt die Spannweite der maximalen Tagesfrachten zwischen 0,423 und 0,525 t/d. Im Vergleich zur Teststrecke am Geisenrücken wurden mit ca. 3 t Feststoff insgesamt eine deutlich höhere Menge über einen kürzeren Messzeitraum (13 Tage) eingeleitet. Auch die mittleren und maximalen Feststoffkonzentrationen liegen mit 144 mg/l und 593 mg/l höher.

Die Spannweite der maximalen Frachten im Unterlauftank liegt zwischen 0,94 und 1,25 t/d. Die Summe über den gesamten Zeitraum beträgt ca. 6,3 t.

Die Differenz zwischen der Feststofffracht vor und nach Zentrifugierung beträgt 3,3 t. Somit wurden ca. 48 % der Feststoffe durch Zentrifugierung und Sedimentation im Unterlauftank entfernt.

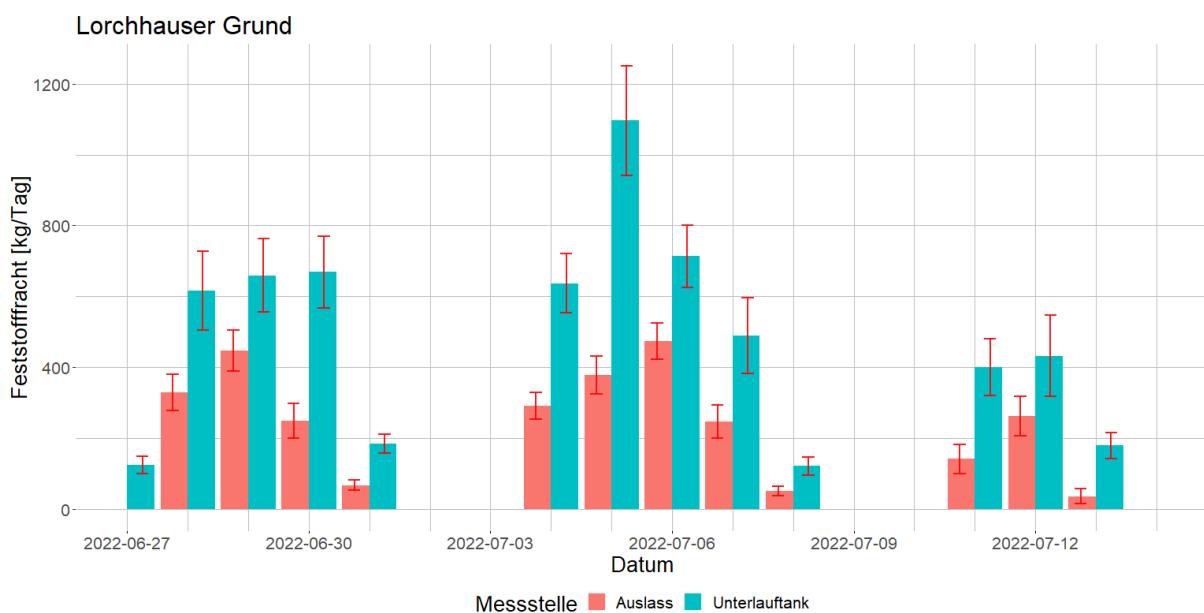


Abbildung 7: Tägliche Feststofffrachten in kg/d an der Teststrecke Lorchhausener Grund für den Auslass (rot) und den Unterlauftank (blau). Die Fehlerbalken entsprechen dem 95 %-Konfidenzintervall.

Abbildung 8 zeigt die maximalen täglichen Feststoffkonzentrationen am Auslass der Teststrecke Lorchhausener Grund im Vergleich mit dem festgelegten Alarmwert von 2500 mg/l (2177 FNU). Ähnlich wie bei der Teststrecke am Geisenrücken liegen die gemessenen Werte deutlich unterhalb dieses Grenzwerts.

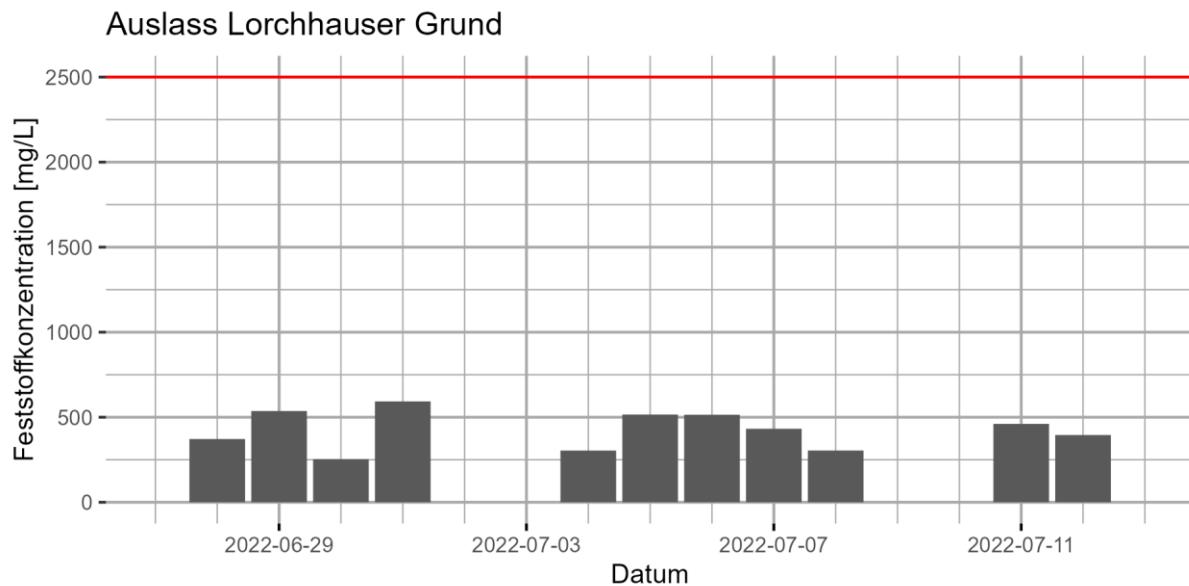


Abbildung 8: Maximale tägliche Feststoffkonzentrationen am Auslass der Teststrecke Lorchhausener Grund und der festgelegte Alarmwert als rote Linie

4.3 Zwischenfazit

Der Vergleich zwischen den zwei Messpunkten (Unterlauftank und Auslass) bei beiden Teststrecken zeigt, dass durch Sedimentation im Unterlauftank und anschließende Zentrifugierung etwa die Hälfte der Feststoffe aus dem Prozesswasser entfernt wurden. Wie hoch die relativen Beiträge von Zentrifuge und Sedimentation zur Minderung der Einträge sind, kann nicht beziffert werden.

Der Vergleich zwischen beiden Teststrecken zeigt, dass die eingeleitete Feststofffracht am Lorchhausener Grund mit insgesamt 3 t wesentlich höher lag als am Geisenrücken mit 0,74 t. Dies wird auch deutlich, wenn man die durchschnittlichen Tagesfrachten vergleicht: Mit 18,1 kg/d lagen diese am Geisenrücken deutlich niedriger als am Lorchhausener Grund (177 kg/d).

Der festgelegte Grenzwert wurde an beiden Teststrecken unter Berücksichtigung der maximalen täglichen Feststoffkonzentrationen jederzeit deutlich unterschritten. Die maximal gemessene Feststoffkonzentration liegt mit 593 mg/l wesentlich niedriger als der festgelegte Grenzwert von 2500 mg/l.

5 Schwebstoffkonzentrationen im Querprofil oberhalb und unterhalb der Baggerversuche

Zur Detektion und Bilanzierung eventuell auftretender Feststoffemissionen durch den Baggerversuch (z. B. Trübungsfahnen) wurden in beiden Teststrecken mittels Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) Querprofilmessungen oberhalb und unterhalb der Baggerungen erhoben. Die bootsgestützten Messungen wurden unterstützt durch das Ingenieurbüro Schmidt GmbH. Wesentlicher Nutzen ist die Möglichkeit, die Schwebstoffkonzentrationen im Querprofil räumlich detailliert darzustellen, um Bereiche in der Wassersäule mit einer möglicherweise erhöhten Konzentration zu identifizieren und ggf. dem Baggerversuch zuordnen zu können. Des Weiteren kann die Gesamtfracht stromabwärts im Längsverlauf des Rheins bilanziert und damit mögliche Zu- oder Abnahmen der Fracht beurteilt werden. Mit Hilfe der Messwerte, welche auf der Baggereinheit erfasst wurden (Kapitel 4.2), kann die in den Rhein eingeleitete Fracht an Feststoffemissionen abgeschätzt werden. Die höheren Frachten wurden in der Teststrecke Lorchhausener Grund (Kapitel 4.2.2) eingeleitet, die mittlere Konzentration lag dort bei 144 mg/l. Der Volumenstrom wird mit maximal 200 m³/h bzw. 0,056 m³/s angegeben. Daraus folgt als konservative Abschätzung eine Feststoffeinleitung von 8060 mg/s¹. Der Abfluss des Rheins während des Baggerversuchs lag mehrheitlich bei Q > 1.000 m³/s (Pegel Kaub). Eine volle Einmischung der Feststoffemissionen bei solchen Abflussbedingungen (konservative Annahme hier Q = 1000 m³/s) würde rechnerisch eine Erhöhung der Konzentrationen im Rhein um rd. 0,008 mg/l bedeuten². Die natürliche Schwebstoffkonzentration während des Baggerversuchs lag im Mittel bei 8,5 mg/l (siehe Tabelle 1), also um den Faktor 1000 höher. Die identische Rechnung für die Ergebnisse bei der Teststrecke Geisenrücken ergibt das Ergebnis einer 6.300-fach höheren Hintergrundkonzentration. Der messtechnische Nachweis der theoretisch vorhandenen Erhöhung mittels ADCP kann bei einer vollen Einmischung aufgrund der um mehrere Größenordnungen kleineren Einleiterkonzentration ausgeschlossen werden. Gleiches gilt später auch für die Auswertung der Trübungsmessungen an der Station St. Goar (siehe Kapitel 6). Es sollen dennoch die Ergebnisse der ADCP Messungen dargestellt und erläutert werden. Ein noch zu überprüfender Aspekt sind möglicherweise lokal erkennbare Trübungsfahnen (Zustand vor einer vollständigen Einmischung) unmittelbar stromab der Baggereinheit.

¹ 144 mg/l * 0,056 m³/s * 1.000 l/m³ = 8060 mg/l

² 8060 mg/s / (1.000 m³/s * 1000 l/m³) = 0,0049 mg/l ≈ 0,008 mg/l

5.1 Messkonzept und -ablauf

ADCPs bieten neben der Abflussmessung, die auf der Dopplerverschiebung des akustischen Signals beruht, zusätzlich die Möglichkeit, Schwebstoffe auf Grundlage der Intensität der rückgestreuten Signale räumlich verteilt im Gewässer zu erfassen. Die ADCP-Standardmessung erfolgt in vier Querfahrten mit konstanter Bootsgeschwindigkeit (BfG, 2007). Für die messtechnische Begleitung der Baggerversuche wurde das Rio Grande WorkHorse ADCP mit einer Frequenz von 1200 kHz verwendet. Die gemessenen Signale wurden an Bord mit der Software WinRiver II Vers. 1.0.0.2 (Teledyne RD Instruments, USA) verarbeitet. Die Auswertung der gemessenen ADCP-Daten erfolgte mit der Software ViSea DAS (Vers. 4.02.80 & 5.03) sowie der Survey Toolbox der Firma Aqua Vision Hydro- & Oceanographic Consultancy (Niederlande).

Da die Echointensität nicht allein von der Schwebstoffkonzentration, sondern auch von den Eigenschaften des Schwebstoffes (Partikelgröße, -form und -dichte, Anteil organischer Bestandteile) abhängig ist, sind Wasserproben zur Kalibration des Rückstreusignals erforderlich. Hierzu wurden Ruttnerflaschen mit einem Volumen von 2 l verwendet. Die Ermittlung der Schwebstoffkonzentrationen erfolgte anschließend im M3-Sedimentlabor der BfG mittels Filtration (Membran-Filter der Marke Sartorius). Für die Ergebnisse dieser Filtration gilt ebenfalls die Genauigkeit von 2 mg/l (vgl. Kapitel 3.1). Die absolute Genauigkeit bei der Bestimmung einer Schwebstoffkonzentration mit dem ADCP beträgt damit höchstens $\pm 1 \text{ mg/l}$.

Die heterogene Verteilung der Schwebstoffe im Gewässerquerschnitt erfordert die Entnahme einer ausreichenden Anzahl von Wasserproben verteilt über den gesamten Gewässerquerschnitt. Die Wasserproben müssen dabei die laterale und vertikale Varianz der Schwebstoffkonzentration abbilden. Zur Berücksichtigung der zeitlichen Varianz des Schwebstofftransports wurde die Probenahme an jedem Arbeitstag wiederholt. Die zusätzlich durchzuführenden Längsfahrten mit Probennahme zur Kalibration des ADCP-Signals erfolgten separat zu den Querfahrten, um den Messablauf nicht zu stören. Während der Probenentnahme in der Längsfahrt war das ADCP aktiviert. Die Zuordnung der im Labor bestimmten Schwebstoffkonzentrationen zu den ADCP-Daten erfolgte durch die genaue Erfassung der Entnahmezeit und -tiefe der Wasserproben.

Alle erfassten ADCP-Daten (4 Querfahrten und Längsfahrten zur Kalibration) wurden je Messprofil in die Software ViSea eingelesen. Um Unterschiede zwischen der Dauer der Probennahme und der zeitlichen Messfrequenz des ADCP zu berücksichtigen, wurden die ermittelten Echointensitäten des ADCPs aus den Längsfahrten bei der Verarbeitung der Daten über mehrere Sekunden gemittelt. Dadurch kann der Entnahmezeitpunkt der Wasserprobe der Tiefenzelle des ADCP-Rückstreusignals mit höherer Sicherheit zugeordnet werden. Nach erfolgter Zuordnung der Wasserproben wurde in der Software eine lineare Regression zwischen Echointensität und Schwebstoffgehalt der Wasserproben erstellt. Mit den aus der Regression ermittelten Koeffizienten werden die Rückstreuintensitäten in Schwebstoffgehalte umgerechnet. Die ermittelten Fließgeschwindigkeiten und Schwebstoffkonzentrationen wurden für jede Messzelle des ADCPs multipliziert. Integriert über den Querschnitt ergibt sich der Schwebstofftransport in kg/s für jede Messfahrt. Die Einzelergebnisse der durchgeföhrten 4 Messfahrten pro Profil (s. Anhang A) wurden anschließend gemittelt.

5.2 Ergebnisse

Insgesamt wurden für den Teilbereich Geisenrücken 7 und den Teilbereich Lorchhausener Grund 6 Messprofile festgelegt (siehe Lagekarten Abbildungen A1 bis A4 im Anhang). Die Lage der Messprofile direkt unterstrom der Baggereinheit wurde an deren jeweilige Lage im Baggerfeld angepasst und konnte somit tagesaktuell variieren, ggf. wurde ein zusätzliches Profil gemessen. Die natürlichen, also von dem Baggerversuch unbeeinflussten Schwebstoffgehalte des Rheins werden an beiden Versuchsstrecken im ersten Messprofil stromauf der Baggereinheit erfasst. Dieses bildet die Referenz für eine Bilanzierung und Beurteilung von Schwebstoffeinträgen. Zur Erkennung kleinräumiger Schwebstoffwolken und deren Einmischung in die freifließende Welle des Rheins wurden 3 bis 4 Messprofile direkt unterstrom beider Teststrecken platziert.

Aus den jeweiligen Messungen liegen folgende Parameter vor: Abfluss [m^3/s], Schwebstofftransport [kg/s] und die berechnete mittlere Schwebstoffkonzentration [mg/l] im Messprofil. Eine Schwebstofffracht [t] für den Messtag kann unter der Annahme konstanter Abflussverhältnisse abgeschätzt werden.

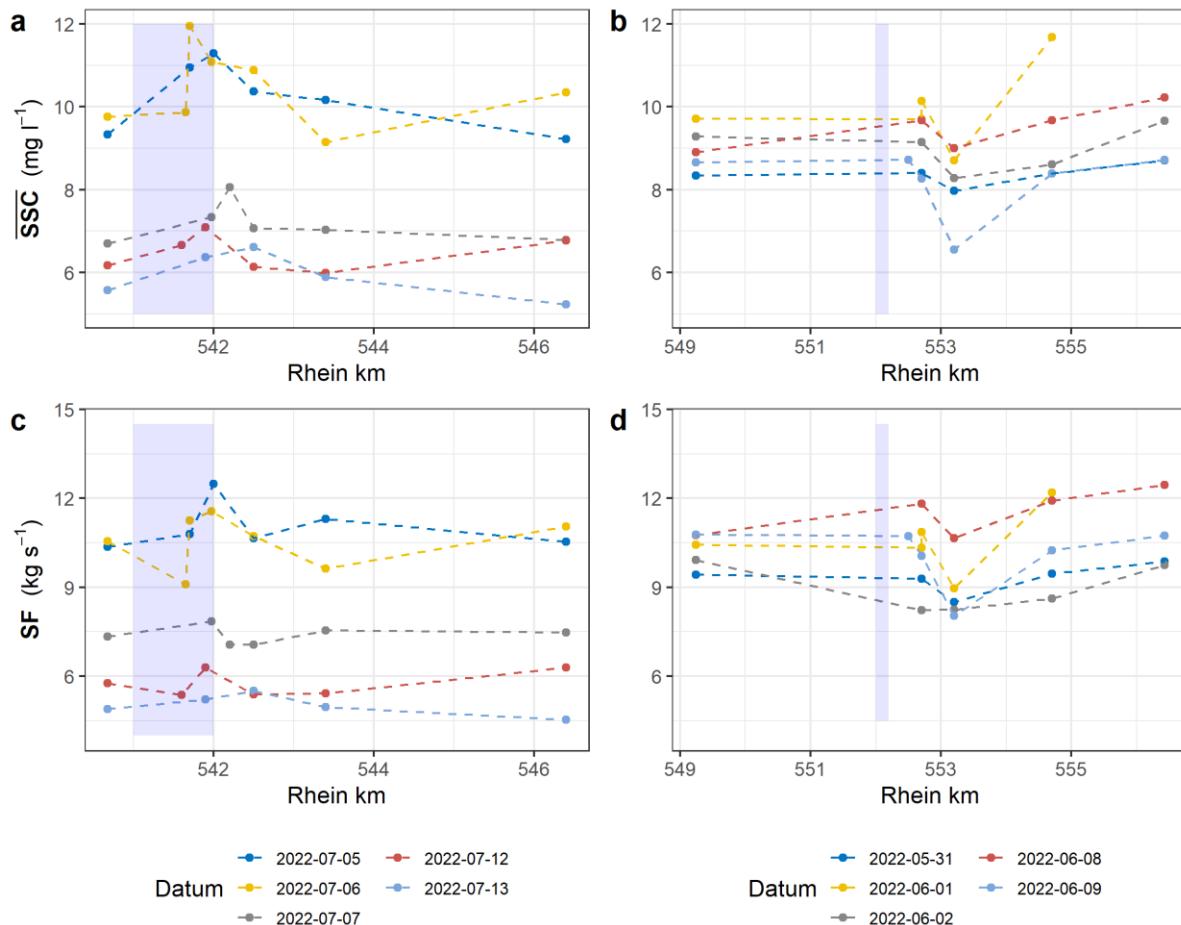


Abbildung 9: Verlauf der Schwebstoffkonzentrationen (oben) und der Schwebstofffrachten (unten) für die Teststrecken Lorchhausener Grund (linke Spalte) und Geisenrücken (rechte Spalte) an den fünf Messtagen. Die blau schattierten Bereiche kennzeichnen die Baggerfelder (Lorchhausener Grund: Rhein-km 541-542 und Geisenrücken: Rhein-km 552 – 552.3).

5.2.1 Teststrecke Geisenrücken

Im Zeitraum vom 31.05. – 09.06.2022 wurden beim Baggerversuch an 5 Messtagen insgesamt 43 Profile gemessen, von denen 3 durch sichtbare Beeinflussung durch die Schifffahrt (z. B. durch den Schraubenstrahl induzierte Einträge von Luftbläschen) nicht zur Betrachtung herangezogen werden konnten. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9 (rechte Spalte) für die Schwebstoffkonzentration (oben) und den Schwebstofftransport (unten) dargestellt. Die Schwebstoffkonzentrationen variieren zwischen 7,0 und 11,9 mg/l, die Schwebstofftransporte liegen zwischen 7,0 und 12,4 kg/s. Die meisten Querprofilmessungen zeigen jedoch ein sehr einheitliches Bild von 8 bis 10 mg/l im Querprofilmittel.

Zum Vergleich: Die am Auslass der Baggereinheit gemessenen Konzentrationen (siehe Kapitel 4.1) bewegten sich an den 5 Messtagen zwischen 21,1 und 30,2 mg/l bei einem eingeleiteten Volumenstrom von 0,056 m³/s. Bei einem Rheinabfluss von ca. 1.100 m³/s käme dies einer maximalen Erhöhung der querschnittsgemittelten Konzentration von 0,0015 mg/l gleich. Dieses Änderungssignal ist so gering, dass messtechnisch eine nachweisbare Beeinflussung der Schwebstoffverhältnisse durch den Baggerversuch nicht möglich ist. Auch ohne das Wissen über die Ergebnisse der Messungen an Bord der Baggereinheit zeigen die ADCP Messungen stromab der Baggereinheit keinen eindeutig systematischen Anstieg der Konzentrationen im Vergleich zur Referenzmessung oberhalb des Baggerfeldes. Der Fall eines systematischen Anstiegs wäre gegeben, wenn bei allen Profilen eine sprunghafte Erhöhung der Konzentration unmittelbar hinter der Baggereinheit gegeben wäre und zusätzlich noch ein konstantes Verharren dieser erhöhten Konzentration auf allen Profilen stromab der Baggereinheit.

Lediglich am 8.6.2022 kann ein leichter Anstieg der Schwebstoffkonzentrationen um ca. 1,5 mg/l ausgemacht werden. Auffällig ist zudem, dass die Schwebstoffkonzentration im räumlichen Verlauf der Querprofile um Rheinkilometer 533 absinkt. Stromab davon kommt es wieder zum Anstieg. Naturräumliche bedingte Schwankungen sind sehr unwahrscheinlich, vielmehr zeigt sich hier die Bandbreite an Ergebnissen infolge von Mess- und Auswerteungsnauigkeiten. Ein ähnliches Bild ergibt sich bei den Schwebstofftransporten. Auch hier ist, wie zu erwarten, kein eindeutiger Anstieg zu verzeichnen. Diese Aussage ist unabhängig von den vorherrschenden Abflussverhältnissen an den jeweiligen Messtagen.

Exemplarisch für das Baggerfeld Geisenrücken wurden in Abbildung A1 (s. Anhang) die Messergebnisse des 31.05.2022 zusammengefasst und visuell aufbereitet. Darin können auch kleinräumige Trübungsfahnen stromab der Baggereinheit ausgeschlossen werden, also Teilflächen im Querschnitt mit deutlich höherer Konzentration als in den umgebenden Flächen.

5.2.2 Teststrecke Lorchhausener Grund

Im Zeitraum vom 05. – 13.07.2022 wurden an 5 Messtagen insgesamt 33 Profile gemessen, von denen alle für die Auswertung herangezogen worden sind. Die ermittelten Schwebstoffkonzentrationen variieren zwischen 5,2 und 11,9 mg/l. Die Schwebstofftransporte liegen zwischen 4,5 und 12,5 kg/s. Die gemessenen Abflüsse der vorliegenden Messungen bewegen sich zwischen 868 m³/s und 1.143 m³/s. Insbesondere an den letzten drei Messtagen lagen ausgeprägt Niedrigwasserabflüsse vor, die sich in geringen Schwebstoffkonzentrationen niederschlagen. Die am Auslass der Baggereinheit gemessenen Konzentrationen lagen an den 5 Messtagen zwischen 49,1 und 225 mg/l. Durch den

starken Verdünnungseffekt durch die Einmischung der Feststoffemissionen in das Rheinwasser ist für diese Teststrecke ein maximaler Anstieg der querschnittsgemittelten Schwebstoffkonzentration von 0,01 mg/l zu erwarten (siehe Kapitel 4.1). Auch hier ist das Änderungssignal so gering, dass messtechnisch eine nachweisbare Beeinflussung der Schwebstoffverhältnisse durch den Baggerversuch nicht möglich ist. Vergleichbar zur Teststrecke Geisenrücken zeigen die ADCP Messungen stromab der Baggereinheit ebenfalls keinen eindeutig systematischen Anstieg der Konzentrationen bzw. Frachten im Vergleich zur Referenzmessung oberhalb des Baggerfeldes. Exemplarisch für das Baggerfeld Lorchhausener Grund wurden in Abbildung A2 (s. Anhang) die Messergebnisse des 07.07.2022 zusammengefasst und visuell aufbereitet. Kleinräumige Trübungsfahnen stromab der Baggereinheit sind hier nicht zu erkennen.

5.3 Zwischenfazit

Aufgrund der auf der Baggereinheit durchgeföhrten Messungen sind die Feststoffemissionen aus dem Prozesswasser bekannt. Eine vollständige Einmischung vorausgesetzt sind die potenziell möglichen Erhöhungen in beiden Teststrecken so gering, dass ein messtechnischer Nachweis per ADCP Messung bei weitem nicht möglich ist. Auch der Vergleich sämtlicher querschnittsgemittelten Schwebstoffkonzentration bzw. -frachten lassen stromab der Baggereinheit keinen systematischen Anstieg der Konzentrationen erkennen. Kleinräumige Trübungsfahnen stromab der Baggereinheit sind in den ADCP Ergebnissen ebenfalls nicht zu erkennen.

6 Dauermessungen an Station St. Goar

Um mögliche Auswirkungen der Baggerversuche auf die Trübungverhältnisse bzw. auf die Schwebstoffkonzentrationen stromab der Teststrecken im Rhein zu erhalten, wurde die Auswertung von Daten des bestehenden Schwebstoffdauermessnetzes an der Station St. Goar (Rhein-km 557) auf temporär erhöhte Werte und Anomalien während des Versuchszeitraums in das Messkonzept aufgenommen. Die Station liegt ca. 5 Kilometer stromab der Teststrecke Geisenrücken. Die Entfernung zur Teststrecke Lorchhausener Grund ist mit ca. 16 km deutlich größer, so dass bei den weiteren Betrachtungen der Fokus auf den Daten der Messstelle liegt, die während der Baggerung in der Teststrecke Geisenrücken gemessen worden sind. Durch Messungen der Feststoffemissionen auf der Baggereinheit (Kapitel 4) kann zwar prinzipiell ausgeschlossen werden, dass ein messtechnischer Nachweis stromab im Gewässer erbracht werden kann. Die potenzielle Erhöhung für die Daten aus der Teststrecke Lorchhausener Grund liegt bei rd. 0,008 mg/l und für die Teststrecke Geisenrücken bei 0,001 mg/l. Die Messungenauigkeit der verwendeten Technik wird hier mit mindestens 2 mg/l angegeben (siehe Kapitel 3.1). Grob überschlagen entspräche diese potenzielle Erhöhung einem Anstieg der Trübungsmessung um den Wert von 0,004 FNU³. Trotz der vielfach größeren Messunsicherheit im Vergleich zum detektierbaren Signal sollen nachfolgend die an der Station St. Goar erzielten Ergebnisse dargestellt und erläutert werden. Bei negativer Befundlage (keine signifikante Änderung der Trübungsverhältnisse in St. Goar) werden dadurch die Befunde auf der Baggereinheit unterstützt.

Das Messkonzept zur Erfassung der Trübungsdaten und der Ableitung von dazu korrespondierenden Schwebstoffkonzentrationen wurde bereits im Kapitel 3.1 beschrieben. Im Fokus dieses Kapitels steht der Vergleich zwischen den Tages- und Nachtwerten der Trübung sowie der Vergleich des Zeitraumes des Baggerversuchs und einem Vergleichszeitraum vom 13.7. – 22.8.2023 nach dem Baggerversuch der durch ähnliche Abflussbedingungen charakterisiert war. Um eine sichere Unterscheidung zwischen aktiven und inaktiven Baggerarbeiten zu gewährleisten wurde im Rahmen eines Tag- Nacht-Vergleichs die folgende Festlegung getroffen:

- Baggerarbeiten finden statt im Zeitraum zwischen 08:00 – 16:00 Uhr.
- Ein Einfluss der Baggerung in der Nacht von 22:00 – 06:00 Uhr kann ausgeschlossen werden, da der Einsatz der Baggereinheit am Tag zuvor ausreichend lange genug zurückliegt.

Entsprechend dieser beiden definierten Zeiträume wurde die Differenz der mittleren Nacht/Tag-Trübung berechnet (siehe Tabelle 2).

³ Vergleiche Tabelle 1, dort ist zu erkennen, dass überschlägig die Umrechnung von mg/l in FNU bei einem Faktor von etwa 0,5 liegt.

Tabelle 2: Tagesweise Mittelwerte der Trübung und des Abflusses an der Messstelle in St. Goar während der Baggerzeit am Tag (8 – 16 Uhr) und der baggerfreien vorhergehenden Nacht (22 – 6 Uhr). Positive Differenz (ΔT und ΔQ) bedeutet, dass die Trübung (bzw. der Abfluss) am Tag über dem Mittelwert der Trübung (bzw. des Abflusses) in der vorhergehenden Nacht gelegen hat. Eine negative Differenz bedeutet entsprechend den umgekehrten Fall.

Datum	Wochen-	Trübung Tr (FNU)			Abfluss Q (m³/s)			
		tag	Baggerzeit	Baggerfreie Zeit	ΔT	Baggerzeit	Baggerfreie Zeit	ΔQ
			(08:00 bis 16:00)	(22:00 bis 06:00)		(08:00 bis 16:00)	(22:00 bis 06:00)	
18.05.2022	Mi	4	4	0	1192	1188	3	
19.05.2022	Do	4	4	-0,16	1182	1205	-24	
20.05.2022	Fr	6	5	0,48	1205	1202	4	
23.05.2022	Mo	6	5	0,64	1253	1248	5	
24.05.2022	Di	7	7	-0,09	1223	1212	12	
25.05.2022	Mi	7	8	-0,5	1263	1267	-4	
26.05.2022	Do	7	8	-0,43	1316	1304	12	
27.05.2022	Fr	7	7	0,39	1349	1379	-30	
30.05.2022	Mo	5	5	0,18	1218	1240	-22	
31.05.2022	Di	5	5	0,42	1134	1164	-30	
01.06.2022	Mi	5	5	0,24	1091	1100	-8	
02.06.2022	Do	5	5	0,26	1078	1090	-12	
03.06.2022	Fr	5	5	0,17	1066	1070	-4	
06.06.2022	Mo	5	5	-0,17	1183	1123	60	
07.06.2022	Di	6	6	0,01	1260	1279	-19	
08.06.2022	Mi	5	5	-0,57	1232	1240	-8	
09.06.2022	Do	4	5	-0,98	1256	1232	24	
10.06.2022	Fr	4	4	-0,22	1357	1328	29	
13.06.2022	Mo	4	4	-0,14	1235	1275	-40	
14.06.2022	Di	3	3	0	1195	1192	3	
15.06.2022	Mi	3	4	-0,1	1124	1149	-26	
16.06.2022	Do	4	4	0,16	1077	1077	0	
17.06.2022	Fr	4	4	-0,06	1061	1064	-3	
20.06.2022	Mo	5	5	-0,53	992	1013	-21	
21.06.2022	Di	4	4	-0,27	1015	1009	6	
22.06.2022	Mi	5	5	-0,14	1013	1002	11	
23.06.2022	Do	4	5	-0,48	988	1003	-15	
24.06.2022	Fr	4	4	-0,45	1021	1019	2	
27.06.2022	Mo	7	6	0,55	1302	1318	-15	
28.06.2022	Di	5	5	-0,4	1306	1305	2	
29.06.2022	Mi	4	5	-0,54	1212	1269	-57	
30.06.2022	Do	4	4	-0,54	1152	1178	-26	
01.07.2022	Fr	4	4	-0,2	1092	1101	-9	
04.07.2022	Mo	5	6	-0,91	1234	1243	-9	
05.07.2022	Di	4	5	-0,71	1130	1160	-30	
06.07.2022	Mi	4	4	-0,38	1056	1081	-25	
07.07.2022	Do	4	4	-0,32	1096	1081	15	
08.07.2022	Fr	4	4	-0,2	1129	1123	6	
11.07.2022	Mo	3	3	-0,25	994	1020	-26	
12.07.2022	Di	3	3	-0,08	925	952	-26	
13.07.2022	Mi	4	4	0,07	871	891	-20	

Da ein Anstieg der Trübung natürlicherweise mit einem ansteigenden Abfluss einhergehen kann, wurde ein besonderes Augenmerk auf die Tage gelegt, die durch eine höhere Trübung am Tag bei gleichzeitig unveränderten oder sogar geringeren Abflüssen im Vergleich zur Nacht gekennzeichnet waren (Abbildung 10, gelb markierte Punkte). Die Anzahl dieser „potentiell auffälligen“ Tage während des Baggerzeitraumes (zwischen 18.5. und dem 13.7.2022, linker Plot in Abbildung 10) wurde mit der Anzahl der „potentiell auffälligen“ Tage im Zeitraum nach der Baggerung (13.7. bis 22.8.2022, rechter Plot in Abbildung 10) verglichen.

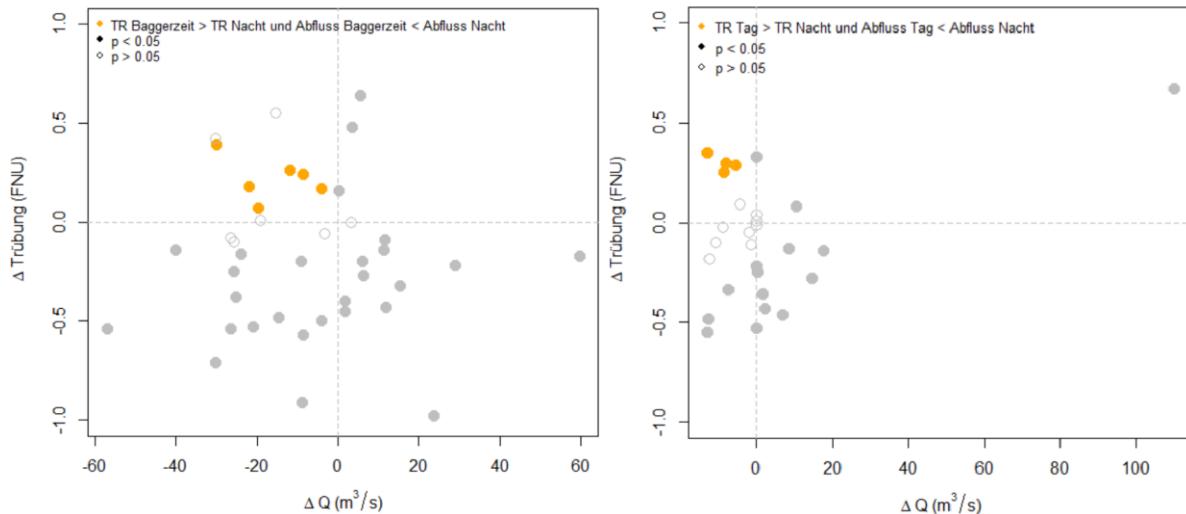


Abbildung 10: Tagesweise Differenzen der Mittelwerte von Trübung und Abfluss am Tag (8 – 16 Uhr) und in der Nacht (22 – 6 Uhr). Positive Differenzen kennzeichnen höhere Trübungen/Abflüsse am Tag (während der Baggerung) im Vergleich zur vorhergehenden (baggerfreien) Nacht. Gelb markierte Punkte kennzeichnen potentiell auffällige Tage mit erhöhter Trübung ($\Delta \text{Trübung} > 0$) und reduzierten Abflüssen ($\Delta Q < 0$) am Tag. Die linke Abbildung bezieht sich auf den Zeitraum der Baggerarbeiten, die rechte Abbildung auf den Vergleichszeitraum nach dem Baggerversuch vom 13.07.2022 bis 22.08.2022 bei ähnlichen niedrigen Abflüssen. Samstage und Sonntage wurden aus der Analyse ausgeschlossen.

Die Trübungs- und Abflussdifferenzen an der Messstelle in St. Goar zwischen Tag und Nacht im Baggerzeitraum (18.5. – 13.7.) sind in der Tabelle 2 zusammengefasst. Die Tag/Nacht-Differenzen der Trübung für alle Tage variieren zwischen -1 und +0,64 FNU, die der Abflüsse zwischen -40 und +60 m^3/s . Der linke Teil der Abbildung 10 zeigt eine graphische Darstellung der Tag/Nacht-Differenzen aus Tabelle 2. An den 41 Tagen im Baggerzeitraum sind an 33 Tagen signifikante Unterschiede ($p < 0.05$ nach Wilcoxon Test) der Trübung zwischen 22 – 6 Uhr und 8 – 16 Uhr zu erkennen. An 9 Tagen (22 %) sind Anstiege während der Baggerzeit zu verzeichnen und an 24 Tagen (59 %) ist die Trübung in der inaktiven Zeit höher als während der Baggerzeit. Von den 9 Tagen fallen lediglich 6 Tage (15 %) mit negativer Abflussdifferenz zusammen (gelbe Punkte in Abbildung 10). Insgesamt überwiegen die Tage, in denen die Trübung nachts größer ist als von 8 – 16 Uhr. Beispielhaft sind vier dieser Tage zwischen dem 23. und dem 28. Mai in Abbildung 11 zu sehen.

Im rechten Teil von Abbildung 10 sind die Trübungs- und Abflussdifferenzen für Vergleichszeitraum nach dem Baggerversuch vom 13.07.2022 bis zum 22.08.2022 bei ähnlich niedrigen Abflussverhältnisse ersichtlich. Die Differenz der mittleren Trübung variiert zwischen -0,55 und + 0,67 FNU. An den 28 Tagen sind 19 signifikante Unterschiede der Trübung der beiden Datensätze zu

erkennen. An 7 Tagen (25 %) sind Anstiege während der Baggerzeit zu verzeichnen und an 12 Tagen (43 %) ist die Trübung in der inaktiven Zeit höher als während der Baggerzeit. Damit überwiegen ebenfalls die Tage, in denen die Trübung nachts größer ist als von 8 – 16 Uhr. Der Anteil der Tage mit erhöhter Trübung zwischen 8 und 16 Uhr ist zwar leicht erhöht im Vergleich zum Baggerzeitraum, setzt man jedoch nur die 4 Tage in Beziehung, an denen der Abfluss gleichzeitig verringert ist ($\Delta Q < 0$), erhält man ebenfalls 15 % der Gesamttagesszahl, an denen die Trübung tags erhöht und der Abfluss verringert ist. Damit kann davon ausgegangen werden, dass während des Zeitraums der Baggerarbeiten die Trübungsverhältnisse keine generellen Veränderungen aufweisen.

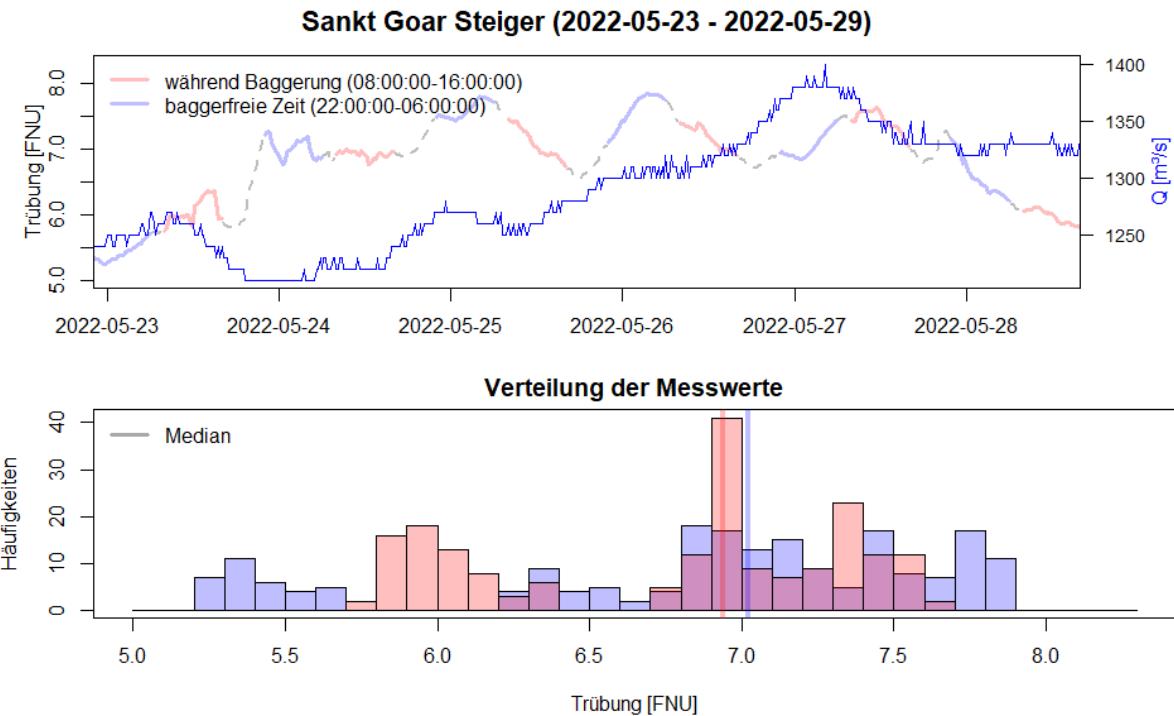


Abbildung 11: Trübungszeitreihe während Baggerung (rot) und während der baggerfreien Zeit (blau) für die zweite Arbeitswoche am Geisenrücken. Unten: Häufigkeitsverteilung der Trübungszeitreihe mit den Medianen.

6.1 Zwischenfazit

Aus den dargestellten Ergebnissen lässt sich auch ohne Kenntnis der Messdaten von der Baggereinheit schlussfolgern, dass durch die Arbeiten am Geisenrücken keine signifikant höheren Schwebstoffkonzentrationen an der Messstelle St. Goar während der Baggerarbeiten zu beobachten waren. Anhand von Abbildung 10 kann keine Häufung von Tagen mit erhöhten Werten während der Baggerzeit festgestellt werden. Die Tage mit erhöhten Trübungswerten während des Tages ($\Delta \text{Tr} > 0$) sind insgesamt sehr gering. Die Anzahl auffälliger Tage mit $\Delta \text{Tr} > 0$ und $\Delta Q < 0$ ist für die Zeit der Baggerarbeit identisch mit dem Vergleichszeitraum und spiegelt die natürliche Variabilität wider.

Damit stützt die Analyse der Daten in St. Goar die Messungen der Feststoffemissionen an der Baggereinheit, die einen vernachlässigbaren Feststoffeintrag ermittelt hat. An der Messstelle in St. Goar können keine Auffälligkeiten ermittelt werden, die im Zusammenhang mit dem Baggerversuch stehen.

7 Schlussfolgerungen

Im Zeitraum von Mai bis Juli 2022 wurden in den Teilabschnitten des Mittelrheins bei Lorch/Niederheimbach (Rhein-km 541,4 – 541,8) und stromabwärts von Oberwesel (Rhein-km 552,0 – 552,3) Baggerversuche im Auftrag des Wasserstraßen- und Schifffahrtsamtes Rhein (WSA Rhein) durchgeführt, welche messtechnisch u. a. durch die BfG, Referat M3, begleitet wurden. Mit den Messungen an verschiedenen Standorten wurden Daten erhoben, welche der Überwachung und Beurteilung von Feststoffemissionen infolge der Baggerversuche dienten. Zugleich wurden auch die Hintergrundverhältnisse für Schwebstoffe im betreffenden Streckenabschnitt erfasst. Die folgenden Ergebnisse wurden erzielt.

Vor Einleitung in den Rhein wurde das Prozesswassers an Bord der Baggereinheit in mehreren Stufen von Feststoffanteilen gereinigt. Die Messungen im gereinigten und eingeleiteten Prozesswasser haben zu den in Tabelle 3 zusammengefassten Ergebnissen geführt.

Tabelle 3: Zusammenfassung Messergebnisse an Bord der Baggereinheit zu Feststoffemission in beiden Teststrecken

	Geisenrücken	Lorchhausener Grund
maximale Tagesfrachten (Spannweite von...bis)	74 bis 120 kg/d	423 bis 525 kg/d
Eingeleitete Gesamtfracht an Feststoff	0,74 t im Zeitraum von 20 Tagen	3 t im Zeitraum von 13 Tagen
Mittlere Feststoffkonzentration	24 mg/l	144 mg/l
Maximale Feststoffkonzentration	176 mg/l	593 mg/l

Das Messkonzept an Bord der Baggereinheit beinhaltete auch eine Echtzeitüberwachung der eingeleiteten Feststoffemissionen. Aufgrund einer Vorabschätzung wurde der Grenzwert bei einer Einleiterkonzentration von 2.500 mg/l festgelegt. Dieser wurde stets deutlich unterschritten, der maximale Wert wurde in der Teststrecke Lorchhausener Grund mit 593 mg/l registriert.

Legt man die folgenden Kennwerte

- maximale mittlere Konzentration 144 mg/l (Teststrecke Lorchhausener Grund),
- maximaler Volumenstrom der Einleitung 200 m³/h bzw. 0,056 m³/s,
- Abflusssituation 1000 m³/s an Pegel Kaub,

zugrunde und setzt eine vollständige Einmischung der Feststoffemissionen in den Abfluss des Rhein voraus, folgt daraus die rechnerische Abschätzung, dass es aufgrund der Baggerung maximal zu einer

Erhöhung der Hintergrundverhältnisse um rd. 0,008 mg/l gekommen sein kann. Etwas stromab an der Messstation St. Goar wurde im Vergleich dazu im Zeitraum des Baggerversuchs (18.05.2022 – 13.07.2022) eine mittlere Schwebstoffkonzentration von 8,5 mg/l ermittelt. Die ADCP Messungen können diese Größenordnung von Schwebstoffkonzentrationen auch stromauf der Baggereinheit in beiden Teststrecken bestätigen. Die Ursachen für die Schwankungen der Messergebnisse je nach gemessenem Querprofil und Zeitpunkt der Messungen liegen in der natürlichen Variabilität des Schwebstofftransports und auch zeitlichen Veränderungen bei den Konzentrationen zwischen zwei Messungen sowie (vermutlich größtenteils) in den Mess- und Auswerteunsicherheiten. An der Station St. Goar konnte beim stundenscharfen Vergleich mittlerer Konzentrationen in Zeiträumen laufender Baggerungen zu nächtlichen Zeiträumen ohne Baggerung kein Hinweis auf eine systematisch messbare Erhöhung erkannt werden.

Die infolge der Baggerversuche rechnerisch möglichen Auswirkungen auf die natürlichen Schwebstoffkonzentrationen (0,008 mg/l, siehe oben) waren für einen messtechnischen Nachweis im Zuge der durchgeföhrten Messungen (ADCP in Kapitel 5) und Dauermessstation St. Goar (in Kapitel 6) zu gering. Das lag zum einen an der natürlichen Variabilität der Schwebstoffverhältnisse, zum anderen kommen die Messunsicherheiten hinzu. Beides in Summe ergibt ein „Messrauschen“, welches um mehrere Größenordnungen größer als das theoretische Einleitersignal war. Sollte bei zukünftigen Baggerungen mit vergleichbar geringen Feststoffemissionen zu rechnen sein, kann das Programm zur Begleitung und Überwachung auf die Messungen an Bord der Baggereinheit reduziert werden. Die zusätzlichen Messungen im Gewässer werden für die abschließende Beurteilung und Berichterstattung der Auswirkungen auf die natürlichen Schwebstoffverhältnisse als nicht erforderlich angesehen.

Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kalibrierkurve (schwarz) und Schwankungsbereich auf Basis des Bootstrap-Verfahrens. Die blauen Datenpaare wurde für die Kalibrierung verwendet, grüne Punkte stellen einzelne Doppelproben und graue Punkte Ausreißer dar. Die rechte Graphik zeigt die Verteilung der a und b Koeffizienten.	9
Abbildung 2: Jahresgang von Abfluss und Schwebstoffkonzentration des Referenzpegels Kaub und der Messstelle in St. Goar, basierend auf den Daten zwischen 1970 und 2022. Die Farbbänder markieren das Intervall zwischen dem 2% und 98%-Quantil. Die grauen Linien kennzeichnen die langjährigen Mittelwerte. Die blaue und braune Linie geben den Jahresgang 2022 wieder.....	11
Abbildung 3: Schematische Darstellung der Baggereinheit mit Fotos der Messstellen der Trübungssonden.....	13
Abbildung 4: Streudiagramme und resultierende Regressionsgleichungen mit 95 %-Konfidenzintervall für den Auslass am Geisenrücken und (a) für den Lorchhausener Grund (b) sowie für den Unterlauftank am Geisenrücken (c) und Lorchhausener Grund (d). conc_mg entspricht der Konzentration in mg/l, tr_FNU der gemessenen Trübung in FNU, R ² dem Bestimmtheitsmaß und n der Stichprobengröße	15
Abbildung 5: Tägliche Feststofffrachten in kg/d an der Teststrecke Geisenrücken für den Auslass (rot) und den Unterlauftank (blau). Die Fehlerbalken entsprechen dem 95 %-Konfidenzintervall.	16
Abbildung 6: Maximale tägliche Feststoffkonzentrationen am Auslass der Teststrecke Geisenrücken und der festgelegte Alarmwert als rote Linie.....	16
Abbildung 7: Tägliche Feststofffrachten in kg/d an der Teststrecke Lorchhausener Grund für den Auslass (rot) und den Unterlauftank (blau). Die Fehlerbalken entsprechen dem 95 %-Konfidenzintervall.	17
Abbildung 8: Maximale tägliche Feststoffkonzentrationen am Auslass der Teststrecke Lorchhausener Grund und der festgelegte Alarmwert als rote Linie	18
Abbildung 9: Verlauf der Schwebstoffkonzentrationen (oben) und der Schwebstofffrachten (unten) für die Teststrecken Lorchhausener Grund (linke Spalte) und Geisenrücken (rechte Spalte) an den fünf Messtagen. Die blau schattierten Bereiche kennzeichnen die	

Baggerfelder (Lorchhausener Grund: Rhein-km 541-542 und Geisenrücken: Rhein-km 552 – 552.3).....	21
--	----

Abbildung 10: Tagesweise Differenzen der Mittelwerte von Trübung und Abfluss am Tag (8 – 16 Uhr) und in der Nacht (22 – 6 Uhr). Positive Differenzen kennzeichnen höhere Trübungen/Abflüsse am Tag (während der Baggerung) im Vergleich zur vorhergehenden (baggerfreien) Nacht. Gelb markierte Punkte kennzeichnen potentiell auffällige Tage mit erhöhter Trübung ($\Delta \text{Trübung} > 0$) und reduzierten Abfluss ($\Delta Q < 0$) am Tag. Die linke Abbildung bezieht sich auf den Zeitraum der Baggerarbeiten, die rechte Abbildung auf den Vergleichszeitraum nach dem Baggerversuch vom 13.07.2022 bis 22.08.2022 bei ähnlichen niedrigen Abflüssen. Samstage und Sonntage wurden aus der Analyse ausgeschlossen.

.....	26
-------	----

Abbildung 11: Trübungszeitreihe während Baggerung (rot) und während der baggerfreien Zeit (blau) für die zweite Arbeitswoche am Geisenrücken. Unten: Häufigkeitsverteilung der Trübungszeitreihe mit den Medianen.

.....	27
-------	----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Daten der Messstelle St. Goar (alte und neue Methode) für verschiedene Zeitspannen und seit Beginn der Datenerhebung.....

.....	10
-------	----

Tabelle 2: Tagesweise Mittelwerte der Trübung und des Abflusses an der Messstelle in St. Goar während der Baggerzeit am Tag (8 – 16 Uhr) und der baggerfreien vorhergehenden Nacht (22 – 6 Uhr). Positive Differenz (ΔTr und ΔQ) bedeutet, dass die Trübung (bzw. der Abfluss) am Tag über dem Mittelwert der Trübung (bzw. des Abflusses) in der vorhergehenden Nacht gelegen hat. Eine negative Differenz bedeutet entsprechend den umgekehrten Fall.

.....	25
-------	----

Tabelle 3: Zusammenfassung Messergebnisse an Bord der Baggereinheit zu Feststoffemission in beiden Teststrecken

.....	29
-------	----

Literaturverzeichnis

BfG 2015. Neuausrichtung des WSV-Messstellennetzes Schwebstoffmonitoring. BfG Bericht 1799. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.

BfG 2007. 5. ADCP Anwendertreffen zur Qualitätssicherung von Abflussdaten vom 11.-13. September 2007 in Koblenz. BfG-Bericht 1586. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.

Anhang A

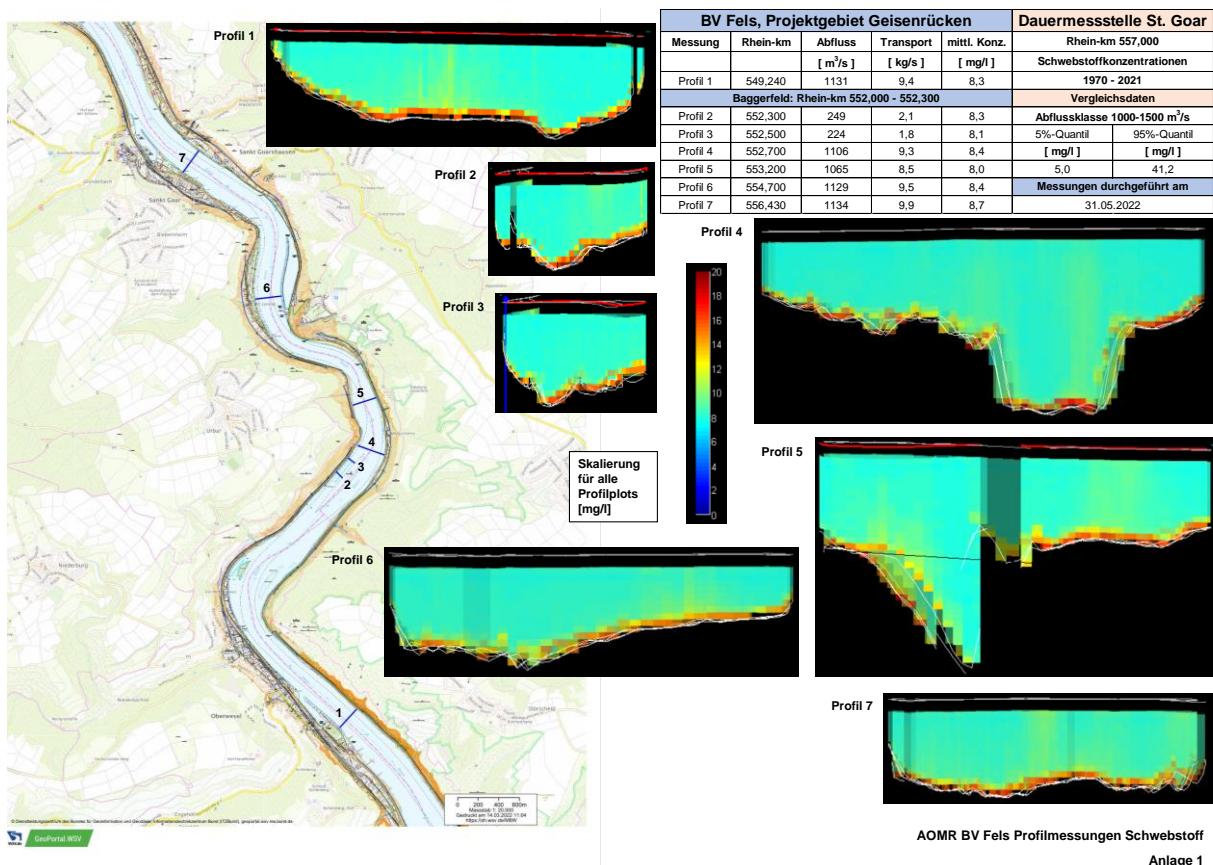
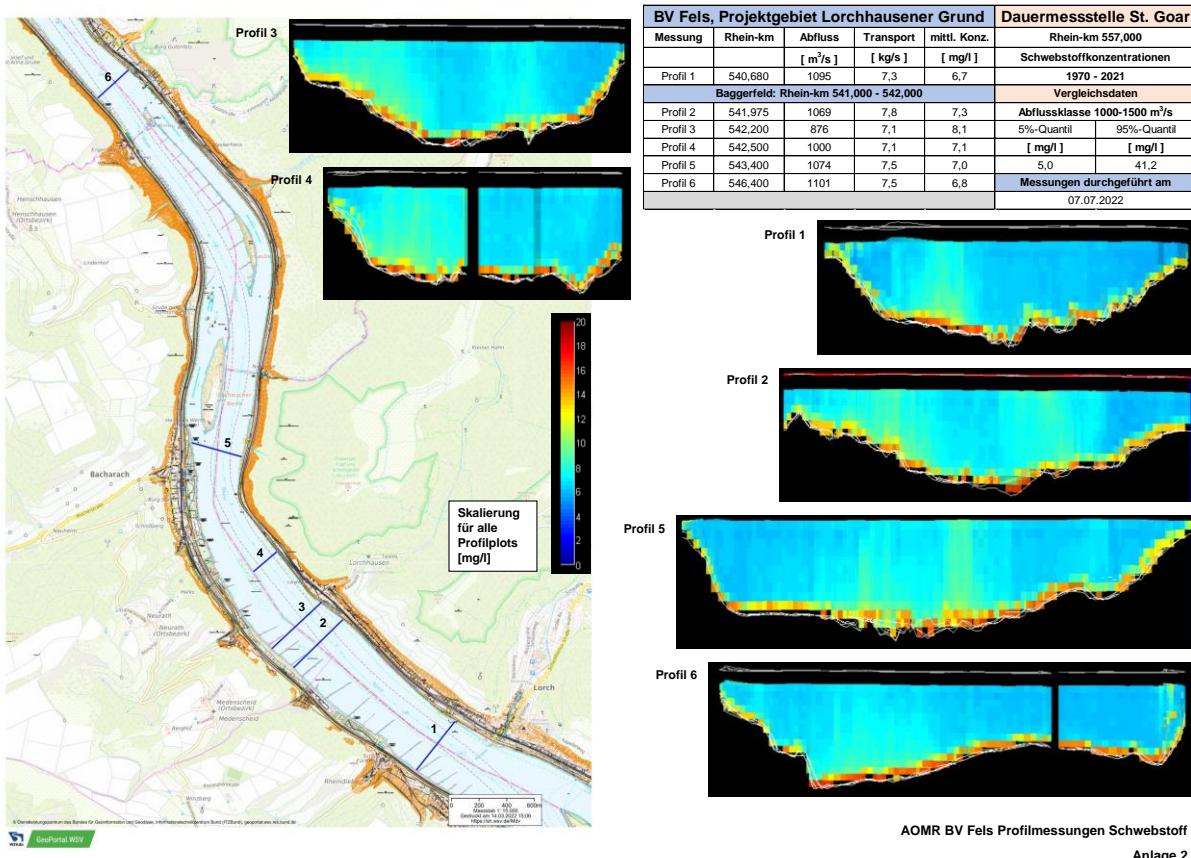


Abbildung A1: Lage der gemessenen ADCP Querprofile am Geisenrücken (hier am Beispiel der Messung am



31.5.2022)

Abbildung A2: Lage der gemessenen ADCP Querprofile am Lorchhausener Grund (hier am Beispiel der Messung am 7.7.2022)

Bundesanstalt für
Gewässerkunde

Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz

Postfach 20 02 53
56002 Koblenz

Tel. 0261/1306-0
Fax 0261/1306-53 02

E-Mail: posteingang@bafg.de
Internet: www.bafg.de