

Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Rhein  
Vorstadt 74-76  
55411 Bingen



## **Anlage 17**

### **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**

### **Gutachten zu Auswirkungen von** **Erschütterungen**

Stand: 16.06.2023

**Abladeoptimierung der  
Fahrrinnen am Mittelrhein  
Baggerversuch im Fels**

**Gutachten zu Auswirkungen  
von Erschütterungen**

**B3952.01.06.10109**

**Abladeoptimierung der  
Fahrrinnen am Mittelrhein  
Baggerversuch im Fels**

**Gutachten zu Auswirkungen  
von Erschütterungen**

Auftraggeber: WSA Rhein

Auftrag vom: 18.09.2020 Az.: 3806E-233.03/E/130-0000-5080/000/

Auftragsnummer: BAW-Nr. B3952.01.06.10109

Aufgestellt von:	Abteilung:	Geotechnik
	Referat:	Baugrunderkundung
	Bearbeitung:	Dr.-Ing. Julia Götz

Karlsruhe, 16.06.2023

Das Gutachten darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.

## **Zusammenfassung**

Das Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Rhein (WSA Rhein) plant die Abladeoptimierung der Fahrrinnen am Mittelrhein. Bei der Abladeoptimierung der Fahrrinnen geht es darum, den lokalen Tiefenengstellen durch örtlich wasserspiegelstützende Maßnahmen und moderate Sohlanpassungen entgegenzuwirken. Der Baggerversuch im Fels wurde im Vorfeld der Maßnahme durchgeführt, um ein Bauverfahren festzulegen, mit dem der Sohlabtrag zielsicher und unter wirtschaftlichen, naturschutzfachlichen sowie planrechtlichen Aspekten umgesetzt werden kann.

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Referat G1 Baugrunderkundung, hat den Baggerversuch mit Schwingungsmessungen begleitet und aus den Messergebnissen eine Bewertung im Rahmen des gesetzlichen Immissionsschutzes abgeleitet.

Die Bewertung der Ergebnisse kann von den Versuchsbereichen „Nebenarm Geisenrücken“ und „Lorchhauser Grund“ auf das gesamte Projektgebiet übertragen werden, da während des Baggerversuchs die für die obere Gebirgsstrecke typischen Baugründe untersucht wurden.

Erschütterungen aus Baggararbeiten, die über die alltäglichen, im Umfeld erzeugten Erschütterungen hinausgehen, konnten nicht festgestellt werden.

Durch die sehr kleinen Schwingungen mit einer relativ hoher Frequenz (89 Hz) werden die Anhaltswerte der DIN 4150-3:2016-12 (Einwirkungen auf bauliche Anlagen) sicher eingehalten. Schäden an anliegenden baulichen Anlagen und erdverlegten Rohrleitungen sind ausgeschlossen.

Ein mögliches Schadenspotenzial durch Setzungen wird ebenfalls ausgeschlossen.

Die Beurteilung der gemessenen Schwingungen nach DIN 4150-2:1999-06 ergibt, dass nicht mit erheblichen Belästigungen von Menschen in Gebäuden zu rechnen ist.

Die bei dem Baggerversuch eingesetzte Frästechnik stellt aus Sicht des Erschütterungsschutzes ein sehr schonendes Verfahren dar. Bei einem weiteren Einsatz dieser Technik ist nicht mit Einwirkungen auf anliegende Schutzgüter oder Menschen in Gebäuden im Sinne der DIN 4150 zu rechnen.

Beweissicherungsmaßnahmen wie z. B. die Dokumentation bestehender Schäden an anliegenden Gebäuden oder der Nachweis der tatsächlich auftretenden Erschütterungen sind nicht notwendig.

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Veranlassung und Aufgabenstellung	1
2	Unterlagen und Daten	1
3	Durchführung des Baggerversuchs im Fels	2
3.1	Versuchsbereich 1 „Nebenarm Geisenrücken“	2
3.2	Versuchsbereich 2 „Lorchhauser Grund“	2
3.3	Gerätetechnik	3
4	Anforderungen an den Erschütterungsschutz	3
4.1	Einwirkungen auf bauliche Anlagen	3
4.2	Einwirkungen auf den Boden im Gründungsbereich von Bauten	5
4.3	Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden	6
5	Schwingungsuntersuchung	8
5.1	Messdurchführung und Messapparaturen	8
5.1.1	Messapparaturen	8
5.1.2	Messdurchführung	10
5.2	Auswertung der Messdaten	12
5.3	Ableitung einer Prognosegleichung für die Erschütterungsprognose	14
6	Bewertung der Ergebnisse	16
6.1	Bewertung der Einwirkungen auf bauliche Anlagen	16
6.2	Bewertung der Einwirkungen auf den Boden im Gründungsbereich von Bauten	16
6.3	Bewertung der Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden	16
7	Schlussfolgerung und Empfehlungen	18
Literaturverzeichnis		19

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
Abbildung 1: MP 1 auf der linken Rheinseite im Nebenarm Geisenrücken (siehe auch Lageplan Anlage 1 und Beschreibung der Messpunkte Tabelle 5).	9
Abbildung 2: Datenbeispiel Nebenarm Geisenrücken, linke Rheinseite (MP 1 und MP 2), An- und Ausschaltvorgang der Fräse: In den Rohdaten dominiert ein vorbeifahrender Zug ((A) & (C)). Erst wenn dieses Signal entfernt wird, sind die Schwingungen aus den Baggerarbeiten (Fräsen) erkennbar ((B) & (D)). Zeitabschnitte in denen die Fräse abgeschaltet war sind schwarz dargestellt („Kebe-System“). Die Signale bei eingeschalteter Fräse sind blau hervorgehoben („Kebe-System“). Die Daten des „Vibras-Systems“ sind als rote Stufen eingezeichnet.	13
Abbildung 3: Datenbeispiel Nebenarm Geisenrücken, linke Rheinseite (MP 1 und MP 2): Zeitverlauf der Schwinggeschwindigkeit ((A) & (C)) und zugehörige Amplitudenspektren ((B) & (D)).	14
Abbildung 4: Nebenarm Geisenrücken: während der Baggerarbeiten gemessene Betragsmaximalwerte $v_{r,max}$ . Dargestellt sind auch die Regression nach Gleichung (4) und die obere Grenze des Vertrauensbereichs ( $P = 95 \%$ , Gleichung (5)).	15
Abbildung 5: Erschütterungseinwirkung auf Menschen in Wohngebäuden: prognostizierte maximale bewertete Schwingstärke $KB_{Fmax}$ bei der oberen Grenze des Vertrauensbereichs ( $P = 95 \%$ ) und Anhaltswerte der DIN 4150-2:1999-06.	17
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
Tabelle 1: Technische Daten der Fräse Erkat ER3000-3 (Auszug, Erkat ® (2023)).	3
Tabelle 2: Anhaltswerte $v_{i,max}$ zur Beurteilung der Wirkung von kurzzeitigen Erschütterungen und Dauererschütterungen auf Gebäude (Tabellen 1 und 4 der DIN 4150-3:2016-12).	5
Tabelle 3: Anhaltswerte $v_{i,max}$ zur Beurteilung der Wirkung von kurzzeitigen Erschütterungen und Dauererschütterungen auf erdverlegte Rohrleitungen (Tabelle 3 und Abschnitt 6.2 der DIN 4150-3:2016-12).	5
Tabelle 4: Anhaltswerte für Erschütterungseinwirkungen auf Menschen durch Baumaßnahmen außer Sprengungen (Tabelle 2 der DIN 4150-2:1999-06).	7
Tabelle 5: Beschreibung der Messpunkte. Die Lage der Messpunkte kann der Anlage 1 (Nebenarm Geisenrücken) und der Anlage 2 (Lorchhauser Grund) entnommen werden. Die Bezeichnung der Messpunkte richtet sich nach dem verwendeten Messsystem: „MP“ steht für das „Kebe-System“, „VMP“ für das „Vibras-System“. Es werden die minimalen Entfernungen ( $R_{min}$ ) und die maximalen Entfernungen ( $R_{max}$ ) zum Baggerversuch angegeben.	11

## **Anlagenverzeichnis**

Anlage 1	Lageplan Messpunkte, Versuchsbereich 1, Nebenarm Geisenrücken
Anlage 2	Lageplan Messpunkte, Versuchsbereich 2, Lorchhauser Grund
Anlage 3	Abladeoptimierung Mittelhrein, Baggerversuch im Fels, Beispielsignal „Kebe-System“
Anlage 4	Abladeoptimierung Mittelhrein, Baggerversuch im Fels, Lorchhauser Grund, Betragsmaximalwerte

## **1 Veranlassung und Aufgabenstellung**

Das Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Rhein (WSA Rhein) plant die Abladeoptimierung der Fahrrinnen am Mittelrhein. Durch die geringe Fahrrinntiefe im Projektgebiet ist an vielen Tagen im Jahr die Transportkapazität der Schiffe eingeschränkt. Der Grund für die geringe Fahrrinntiefe sind lokale Tiefenengstellen, welchen durch örtliche wasserspiegelstützende Maßnahmen und moderaten Sohlanpassungen entgegengewirkt werden sollen.

Der Baggerversuch im Fels wurde im Vorfeld der Maßnahme durchgeführt, um ein Bauverfahren festzulegen, mit dem der Sohlabtrag zielsicher und unter wirtschaftlichen, naturschutzfachlichen sowie planrechtlichen Aspekten umgesetzt werden kann.

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Referat G1 Baugrunderkundung, hat den Baggerversuch mit Schwingungsmessungen begleitet, um die Auswirkungen von Erschütterungen auf angrenzende Schutzgüter beurteilen zu können [U1.1].

Das vorliegende Gutachten enthält die Ergebnisse der durchgeführten Messungen sowie deren Bewertung im Rahmen des gesetzlichen Immissionsschutzes.

## **2 Unterlagen und Daten**

Folgende Unterlagen wurden für die Bearbeitung verwendet:

### **[U1] Schriftverkehr**

- [U1.1] WSA Rhein (2020): Abladeoptimierung der Fahrrinnen am Mittelrhein (AOMR) Erschütterungsgutachten, E-Mail mit dem Betreff: WG: Anschreiben Auftrag BAW (Dr. Götz) Erschütterungsgutachten vom 18.09.2020.

### **[U2] Berichte**

- [U2.1] Bundesanstalt für Wasserbau (2017): Laborbericht Erkundung der Rheinsohle mit dem TGS Carl Straat im Mai 2016, BAW-Nr. B3952.04.10359 (aufgestellt am 10.01.2017).
- [U2.2] Bundesanstalt für Wasserbau (2012): Setzungen von Sanden bei Schwingungsanregung, FuE-Abschlussbericht, BAW-Nr. A3952.05.70001 (aufgestellt am 28.11.2012).
- [U2.3] Bundesanstalt für Wasserbau (2015): Statistische Auswertung von Erschütterungsemissionen, FuE-Abschlussbericht, BAW-Nr. A3952.05.70002 (aufgestellt am 24.11.2015).

### **[U3] Normen**

- [U3.1] DIN 4150-1:2001-06, Erschütterungen im Bauwesen, Teil 1: Vorermittlung von Schwingungsgrößen, Beuth Verlag GmbH Berlin.
- [U3.2] DIN 4150-2:1999-06, Erschütterungen im Bauwesen, Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden, Beuth Verlag GmbH Berlin.
- [U3.3] DIN 4150-3:2016-12, Erschütterungen im Bauwesen, Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen, Beuth Verlag GmbH Berlin.

## **[U4] Datengrundlage**

[U4.1] Bundesanstalt für Wasserbau: PAB Prognose – Analyse – Bewertung, Version 16-4 [Software].

## **3 Durchführung des Baggerversuchs im Fels**

Das Projektgebiet ist in drei Teilabschnitte eingeteilt, der Baggerversuch wurde in den Teilabschnitten 2 und 3 durchgeführt. Im Vorfeld des Baggerversuches wurden die für die obere Gebirgsstrecke typischen Baugründe untersucht.

### **3.1 Versuchsbereich 1 „Nebenarm Geisenrücken“**

Der Versuchsbereich 1 befindet sich stromabwärts von Oberwesel im „Nebenarm Geisenrücken“ (Rhein-km 552,0 – 552,3) im Teilabschnitt 3 des Projektgebiets. Für den Versuchsbereich „Nebenarm Geisenrücken“ ist ein Abtragsvolumen von 190 m<sup>3</sup> bei einer Eingriffsfläche von 2204 m<sup>2</sup> und einer mittleren Abtragshöhe von 8 cm ermittelt worden. Die Baggerung findet über die gesamte Breite des Nebenarmes Geisenrücken statt (siehe Lageplan Anlage 1).

Nach dem geotechnischen Laborbericht [U2.1] wird das dort vorherrschende Gestein als Grauwacke und Grauwackenschiefer bezeichnet. Die einaxialen Druckfestigkeiten wurden in der Bandbreite von  $\sigma_U = 7 \text{ MN/m}^2 - 85 \text{ MN/m}^2$  ermittelt. Die Punktlastindizes lagen im Bereich von  $I_S = 0,1 \text{ MN/m}^2 - 8,4 \text{ MN/m}^2$ . Die Spaltzugfestigkeit lag zwischen  $\sigma_Z = 5,6 \text{ MN/m}^2 - 9,9 \text{ MN/m}^2$ . Die Zähigkeit des Materials liegt mit  $Z = 2 - 15$  in einem Bereich für sehr zähes bis sprödes Material.

### **3.2 Versuchsbereich 2 „Lorchhauser Grund“**

Der Versuchsbereich 2 befindet sich bei Lorch/Niederheimbach im „Lorchhauser Grund“ (Rhein-km 541,4 – 541,8) im Teilabschnitt 2 des Projektgebiets.

Für den Versuchsbereich „Lorchhauser Grund“ ist ein Abtragsvolumen von 278 m<sup>3</sup> bei einer Eingriffsfläche von 2378 m<sup>2</sup> und einer mittleren Abtragshöhe von 10 cm ermittelt worden. Die beschriebene Baggerung soll in vier Baggerfeldern durchgeführt werden (siehe Lageplan Anlage 2).

Nach dem geotechnischen Laborbericht [U2.1] wurde dort überwiegend Tonschiefer angetroffen. Die Druckfestigkeit lag zwischen  $\sigma_U = 0,6 \text{ MN/m}^2 - 23 \text{ MN/m}^2$ . Die Punktlastindizes schwanken zwischen  $I_S = 0,1 \text{ MN/m}^2 - 7,2 \text{ MN/m}^2$ . Die Spaltzugfestigkeit wurde in der Spanne von  $\sigma_Z = 2 \text{ MN/m}^2 - 12 \text{ MN/m}^2$  ermittelt. Die Zähigkeit des Tonschiefers errechnet sich hier zu  $Z = 23/2 = 12$  bzw.  $Z = 0,6/12 = 0,05$ , was auf sprödes bis sehr zähes Material schließen lässt. An einer Stelle war das Material stark mit Quarzadern durchzogen. Das dort gewonnene Material war mit  $\sigma_U = 50 \text{ MN/m}^2 - 136 \text{ MN/m}^2$  deutlich härter (Punktlastindex  $I_S = 1,6 \text{ MN/m}^2 - 3,6 \text{ MN/m}^2$ ).

### 3.3 Gerätetechnik

Für den Baggerversuch ist ein eigenes, auf die Projektstrecke abgestimmtes Gerätekonzept entwickelt worden. Als Geräteeinheit wurde ein Hydraulikbagger mit eingehauster Fräse vom Typ *Erkat ER3000-3* eingesetzt (technische Daten siehe Tabelle 1).

*Tabelle 1: Technische Daten der Fräse Erkat ER3000-3 (Auszug, Erkat ® (2023)).*

Gewicht	3500 kg
Nennleistung	200 kW
empfohlene Drehzahl	53 U/min
empfohlene Ölmenge	450 l/min
max. Ölmenge bei 10 bar	500 l/min
max. hydraulischer Betriebsdruck	350 bar
Drehmoment bei 350 bar	46800 Nm
Schneidkraft bei 350 bar	116900 bar
Breite des Schneidkopfes	1330 mm
Durchmesser des Schneidkopfes	805 mm
Anzahl der Meißel	64 Stk.

## 4 Anforderungen an den Erschütterungsschutz

### 4.1 Einwirkungen auf bauliche Anlagen

In der DIN 4150-3:2016-12 [U3.3] werden Anhaltswerte für die Schwinggeschwindigkeit an Bauwerksmesspunkten angegeben, bei deren Einhaltung Schäden im Sinne der Verminderung des Gebrauchswertes von Bauwerken erfahrungsgemäß nicht zu erwarten sind. Die Anhaltswerte der DIN 4150-3:2016-12 sind hier in der Tabelle 2 zusammengefasst.

Eine Verminderung des Gebrauchswertes von Gebäuden oder Gebäudeteilen durch Erschütterungseinwirkungen im Sinne der DIN 4150-3:2016-12 ist z. B.:

- die Beeinträchtigung der Standsicherheit von Gebäuden und Bauteilen
- die Verminderung der Tragfähigkeit von Decken

Bei Gebäuden nach Zeile 2 und Zeile 3 der Tabelle 2 ist eine Verminderung des Gebrauchswertes auch gegeben, wenn z. B.:

- Risse im Putz von Wänden auftreten
- bereits vorhandene Risse in Gebäuden vergrößert werden
- Trenn- oder Zwischenwände von tragenden Wänden oder Decken abreißen

Diese Schäden werden auch als leichte Schäden bezeichnet.

Die Messgröße Schwinggeschwindigkeit  $v_i$  (Richtungskomponenten  $i = x, y, z$ ) und deren maßgebende Frequenz  $f$  werden für die Bewertung der durch Erschütterungen aus Baumaßnahmen verursachten Einwirkungen auf Bauwerke und Bauteile herangezogen, da zwischen der Schwinggeschwindigkeit und den Bauwerks- bzw. Bauteilbeanspruchungen näherungsweise ein linearer Zusammenhang nachgewiesen wurde. Beurteilt werden die Größtwerte der Ganzkörperschwingungen des Bauwerkes, gemessen am Fundament ( $v_F$ , Betragsmaximalwert der drei Richtungskomponenten  $x, y, z$ ) und bei Gebäuden auch an der Außenwand im obersten Vollgeschoss ( $v_{OG}$ , Betragsmaximalwert der horizontalen Komponenten  $x, y$ ). Die Beurteilung von Decken erfolgt anhand der Deckenschwingungen, gemessen am Ort der größten Schwingung im Allgemeinen die Deckenmitte ( $v_D$ , Betragsmaximalwert der vertikalen Komponente  $z$ ) [U3.3].

Die Norm unterscheidet kurzzeitige Bauwerkserschütterungen und Dauererschütterungen. Kurzzeitige Erschütterungen sind „Erschütterungen, deren Häufigkeit für Ermüdungserscheinungen und deren zeitlicher Abstand für Resonanzerscheinungen unerheblich ist“ [U3.3]. Dauererschütterungen sind alle Erschütterungen, auf die die Definition der kurzzeitigen Erschütterungen nicht zutrifft.

Die Erschütterungen bei den Baggerarbeiten im Fels können sowohl kurzzeitige Erschütterungen als auch Dauererschütterungen hervorrufen. Kurzzeitige Erschütterungen entstehen z. B. durch das Aufsetzen des Fräskopfes auf der Gewässersohle. Aufgrund der Arbeitsweise der Fräse, der dauernden Energiezufuhr bei einer bestimmten Arbeitsdrehzahl, können Resonanzerscheinungen nicht ausgeschlossen werden, weshalb auch Dauererschütterungen bewertet werden müssen.

In der Abbildung 2 (D) ist z. B. bei 63 s eine kurzzeitige Erschütterung als Spitze in den Daten zu erkennen, gefolgt von Schwingungen die als Dauererschütterungen zu bewerten sind. Ein weiteres Beispiel ist in Anlage 3 zu finden. Hier ist die kurzzeitige Erschütterung bei 34 s zu sehen.

**Tabelle 2:** Anhaltswerte  $v_{i,max}$  zur Beurteilung der Wirkung von kurzzeitigen Erschütterungen und Dauererschütterungen auf Gebäude (Tabellen 1 und 4 der DIN 4150-3:2016-12).

Zeile	Gebäudeart	Anhaltswerte für die Schwinggeschwindigkeit $v_{i,max}$ in mm/s						
		kurzzeitige Erschütterungen					Dauererschütterungen	
		Fundament			Deckenebene des obersten Vollgeschosses, horizontal	vertikale Deckenschwingungen	Deckenebene des obersten Vollgeschosses, horizontal	vertikale Deckenschwingungen
		Frequenzen $f$ in Hz			alle Frequenzen	alle Frequenzen	alle Frequenzen	alle Frequenzen
		<10	10 - 50 <sup>1)</sup>	50 - 100 <sup>1)</sup>				
1	Gewerblich genutzte Bauten, Industriebauten und ähnlich strukturierte Bauten	20	20 - 40	40 - 50	40	20	10	10
2	Wohngebäude und in ihrer Konstruktion und/oder Nutzung gleichartige Bauten	5	5 - 15	15 - 20	15	20	5	10
3	Bauten, die wegen ihrer besonderen Erschütterungsempfindlichkeit nicht denen nach Zeile 1 und 2 entsprechen und besonders erhaltenswert (z. B. unter Denkmalschutz stehend) sind	3	3 - 8	8 - 10	8	20 <sup>2)</sup>	2,5	10 <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden. Bei Frequenzen über 100 Hz dürfen mindestens die Anhaltswerte für 100 Hz angesetzt werden

<sup>2)</sup> Zur Verhinderung leichter Schäden kann eine deutliche Abminderung dieses Anhaltswertes notwendig werden

Für erdverlegte Rohrleitungen werden in der DIN 4150-3:2016-12 Anhaltswerte für die Beurteilung von kurzzeitigen und dauerhaften Erschütterungseinwirkungen angegeben. Die Anhaltswerte für erdverlegte Rohrleitungen sind hier in Tabelle 3 zusammengestellt.

**Tabelle 3:** Anhaltswerte  $v_{i,max}$  zur Beurteilung der Wirkung von kurzzeitigen Erschütterungen und Dauererschütterungen auf erdverlegte Rohrleitungen (Tabelle 3 und Abschnitt 6.2 der DIN 4150-3:2016-12).

Zeile	Leitungsbaustoffe	Anhaltswerte für die Schwinggeschwindigkeit $v_{i,max}$ in mm/s auf der Rohrleitung	
		kurzzeitige Erschütterungen	Dauererschütterungen
1	Stahl, geschweißt	100	50
2	Steinzeug, Beton, Stahlbeton, Spannbeton, Metall mit und ohne Flansche	80	40
3	Mauerwerk, Kunststoff	50	25

## 4.2 Einwirkungen auf den Boden im Gründungsbereich von Bauten

Dynamische Beanspruchungen des Bodens verursachen je nach Intensität der Einwirkungen elastische oder plastische (bleibende) Verformungen. Die Auswirkungen von Erschütterungen auf

den Boden im Gründungsbereich von Bauten werden mit den o. g. Anhaltswerten der DIN 4150-3:2016-12 nicht berücksichtigt. Für die Bewertung von Erschütterungen hinsichtlich der Auswirkungen auf den Boden im Gründungsbereich von Bauten werden in den Normen keine quantitativen Aussagen gemacht.

In der DIN 4150-3:2016-12 Abschnitt 4.6 [U3.3] wird angeführt: „Vor allem in locker bis mitteldicht gelagerten nichtbindigen Böden (Sande, Kiese) können starke Erschütterungen zu Sackungen des Bodens und damit zu Setzungen von Gründungskörpern führen. Das gilt besonders für häufige Erschütterungen, für gleichförmige Sande und für Böden unterhalb des Grundwasserspiegels“.

Bei Bauten die auf Fels gegründet sind, ist nicht mit Setzungen zu rechnen.

Zur Beurteilung der Schwinggeschwindigkeit an Bodenmesspunkten wird aus den zueinander rechtwinklig angeordneten Richtungskomponenten der Schwinggeschwindigkeit  $v_i(t)$  ( $i = x, y, z$  mit  $x, y$  horizontale Komponenten und  $z$  vertikale Komponente) der Betrag des Vektors der Schwinggeschwindigkeit  $v_r(t)$  gebildet (Gleichung (1)). Zur weiteren Betrachtung werden die an den Bodenmesspunkten auftretenden Größtwerte des Vektors der Schwinggeschwindigkeit herangezogen (Gleichung (2)).

$$v_r(t) = \left\{ \sqrt{v_x(t)^2 + v_y(t)^2 + v_z(t)^2} \right\} \quad (1)$$

$$v_{r,max} = \max\{v_r(t)\} \quad (2)$$

In einem Forschungsvorhaben der BAW [U2.2] konnte gezeigt werden, dass auch bei einer sehr geringen Lagerungsdichte des Bodens (z. B. locker gelagerte Sande ohne Auflast) bei Grenzschwinggeschwindigkeiten von  $v_{r,max} = 6 \text{ mm/s}$  an der Geländeoberkante (GOK) die Setzungsbeträge der GOK unter  $S = 1 \text{ mm}$  bleiben.

### 4.3 Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden

Die Norm DIN 4150-2:1999-06 [U3.2] enthält Festlegungen zum Schutz von Menschen vor erheblichen Belästigungen durch Schwingungen in Gebäuden. Beurteilungsgröße ist zunächst die maximale bewertete Schwingstärke  $KB_{Fmax}$ , die durch gleitende Effektivwertbildung aus dem frequenzbewerteten Zeitsignal der Schwinggeschwindigkeit  $v(t)$  gewonnen wird.

Für Baumaßnahmen gelten tagsüber die Anhaltswerte der Tabelle 2 der DIN 4150-2:1999-06 (hier Tabelle 4). Dabei wird auf eine Unterteilung nach Baugebietsarten weitgehend verzichtet. Für besonders schutzwürdige Gebiete (Objekte), wie z. B. Krankenhäuser ist Tabelle 4 nicht anwendbar. Solche Fälle erfordern gesonderte Untersuchungen und Absprachen.

In der Tabelle 4 werden drei verschiedene Anhaltswerte genannt: der sogenannte „untere Anhaltswert“  $A_u$ , der „obere Anhaltswert“  $A_o$  und der „Anhaltswert zum Vergleich mit der Beurteilungs-Schwingstärke“  $A_r$ . Die Festlegungen der DIN 4150-2:1999-06 werden ohne weiteren Nachweis eingehalten, wenn  $KB_{Fmax} \leq A_u$  ist, sie werden nicht eingehalten für  $KB_{Fmax} > A_o$ . Für den Fall  $A_u < KB_{Fmax} \leq A_o$  muss die Beurteilungs-Schwingstärke  $KB_{Ftr}$  bestimmt werden. Dies erfolgt unter Einbeziehung der zeitlichen Dauer der einzelnen Größenanteile der Einwirkungen (Unterteilung der Mess- und Einwirkungszeit in Takte von 30 s Dauer) sowie der

Berücksichtigung von Ruhezeiten (s. Abschnitt 6.4 der DIN 4150-2:1999-06). Die Forderungen der Norm gelten als erfüllt für  $KB_{Ftr} \leq A_r$ . Die Einhaltung kann gegebenenfalls durch die Verringerung der täglichen Einwirkungszeit erreicht werden.

Unter der Dauer  $D$  der Erschütterungseinwirkungen ist die Anzahl von Tagen zu verstehen, an denen tatsächlich Erschütterungseinwirkungen auftreten (nicht die Dauer der Baumaßnahme an sich). Dabei sind Tage mit Erschütterungseinwirkungen, die unter den Werten der Tabelle 1 der DIN 4150-2:1999-06 für  $A_u$  oder  $A_r$  liegen (z. B. für Wohngebiete 0,15 und 0,07), nicht mitzuzählen.

**Tabelle 4:** Anhaltswerte für Erschütterungseinwirkungen auf Menschen durch Baumaßnahmen außer Sprengungen (Tabelle 2 der DIN 4150-2:1999-06).

Dauer	$D \leq 1$ Tag <sup>1)</sup>			6 Tage < $D \leq 26$ Tage			26 Tage < $D \leq 78$ Tage		
Anhaltswerte	$A_u$	$A_o$ <sup>2)</sup>	$A_r$	$A_u$	$A_o$ <sup>2)</sup>	$A_r$	$A_u$	$A_o$ <sup>2)</sup>	$A_r$
Stufe I	0,8	5	0,4	0,4	5	0,3	0,3	5	0,2
Stufe II	1,2	5	0,8	0,8	5	0,6	0,6	5	0,4
Stufe III	1,6	5	1,2	1,2	5	1,0	0,8	5	0,6
Beurteilungsgröße	$KB_{Fmax}$		$KB_{Ftr}$	$KB_{Fmax}$		$KB_{Ftr}$	$KB_{Fmax}$		$KB_{Ftr}$

<sup>1)</sup> die  $A$  – Werte für 2 bis 5 Einwirkungstage sind linear zu interpolieren

<sup>2)</sup> für Gewerbe- und Industriegebiete gilt  $A_o = 6$

Die Beurteilung von zeitlich begrenzten Erschütterungseinwirkungen durch Baumaßnahmen erfolgt in drei Stufen. Bei Unterschreitung des Anhaltswertes der Stufe I ist auch ohne besondere Vorinformation der Betroffenen nicht mit erheblichen Belästigungen zu rechnen. Mit erheblichen Belästigungen im Sinne der DIN 4150-2:1999-06 ist bei Einhaltung des Anhaltswertes der Stufe II dann nicht zu rechnen, wenn vor Baubeginn die nachfolgend genannten Maßnahmen ergriffen werden [U3.2]:

- umfassende Information der Betroffenen über die Baumaßnahme, das Bauverfahren, die Dauer und die zu erwartenden Erschütterungen aus dem Baubetrieb
- Aufklärung über die Unvermeidbarkeit von Erschütterungen infolge der Baumaßnahmen und die damit verbundenen Belästigungen
- zusätzliche baubetriebliche Maßnahmen zur Minderung und Begrenzung der Belästigungen (Pausen, Ruhezeiten, Betriebsweise der Erschütterungsquelle usw.)
- Benennung einer Ansprechstelle, an die sich Betroffene wenden können, wenn sie besondere Probleme durch Erschütterungswirkungen haben
- Information der Betroffenen über die Erschütterungseinwirkungen auf das Gebäude

und nach Beginn der Baumaßnahme gegebenenfalls (im Beschwerdefall) auch

- Nachweis der tatsächlich auftretenden Erschütterungen durch Messungen sowie deren Beurteilung bezüglich der Wirkung auf Menschen und Gebäude

Bei zunehmender Überschreitung des Anhaltswertes der Stufe II werden mit wachsender Wahrscheinlichkeit erhebliche Belästigungen auftreten. Es ist deshalb zu prüfen, ob der Einsatz weniger erschütterungsintensiver Verfahren möglich ist. Wird zur Verringerung der Erschütterungsbelastung z. B. eine erhebliche Bauzeitverlängerung und damit verlängerte Erschütterungsbelastung auf niedrigerem Niveau eventuell in Verbindung mit erhöhter Lärm- und/oder Schmutzbelastung notwendig, dann ist die Zumutbarkeit zeitlich begrenzter Erschütterungseinwirkungen auch im Bereich erheblicher Belästigungen bis zu einer Zumutbarkeitsschwelle (Stufe III) abzuwägen. In solchen Fällen sollte den Betroffenen die Sorge wegen befürchteter Nachteile durch Schäden am Gebäude durch Beweissicherung und Zusagen bezüglich der Behebung möglicher Schäden genommen werden. Bei Überschreitung der Stufe III wird die Vereinbarung besonderer Maßnahmen notwendig.

Die Messung der Erschütterungen muss auf dem Fußboden des zu untersuchenden Raumes vorgenommen werden, und zwar an den Stellen, an denen die stärksten Erschütterungen zu erwarten sind. In der Erschütterungsprognose sind die Schwingungen auf der obersten Deckenebene  $v_D$  am größten, weshalb  $KB_{Fmax}$  näherungsweise aus  $v_D$  bestimmt wird [U3.2]:

$$KB_{Fmax} = c_F \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{v_D}{\sqrt{1 + (f_0/f)^2}} \quad (3)$$

$KB_{Fmax}$	bewertete Schwingstärke
$c_F$	Faktor für die Art der Schwingungseinwirkung ( $0,6 \leq c_F \leq 0,9$ gem. Tabelle 3 in DIN 4150-2:1999-06)
$v_D$	Betragsmaximalwert der Schwinggeschwindigkeit $v_i(t)$ auf dem Fußboden am Ort der größten Schwingungen
$f$	dazugehörige Frequenz in Hz
$f_0$	Grenzfrequenz des Hochpasses ( $f_0 = 5,6$ Hz)

## 5 Schwingungsuntersuchung

### 5.1 Messdurchführung und Messapparaturen

Der Baggerversuch im Nebenarm Geisenrücken (Versuchsbereich 1) wurde vom 31.05.2022 bis zum 02.06.2022 durch Erschütterungsmessungen begleitet. Die Erschütterungsmessungen im Lorchhauser Grund (Versuchsbereich 2) fanden vom 05.07.2022 bis zum 07.07.2022 statt.

#### 5.1.1 Messapparaturen

Für die Bewertung der durch Erschütterungen aus Baumaßnahmen verursachten Einwirkungen auf Bauwerke wird als Mess- und Beurteilungsgröße vorrangig die Schwinggeschwindigkeit und deren Frequenz herangezogen, da zwischen der Schwinggeschwindigkeit und Bauwerks- bzw. Bauteilbeanspruchungen näherungsweise ein linearer Zusammenhang besteht (Abschnitt 4.1).

Die Schwinggeschwindigkeit wird mit Geophonen gemessen. Eine Messstelle (siehe Abbildung 1) besteht aus drei Geophonen zur Erfassung der drei Komponenten der Schwinggeschwindigkeit  $v_i$

(Index  $i$  steht für die Richtungskomponenten  $x$ ,  $y$  und  $z$ ),  $z$  ist die vertikale Messrichtung,  $x$  und  $y$  sind die zueinander rechtwinkligen horizontalen Messrichtungen.

Die Abbildung 1 zeigt beispielhaft die Messstelle MP 1 auf der linken Rheinseite im Nebenarm Geisenrücken.



Abbildung 1: MP 1 auf der linken Rheinseite im Nebenarm Geisenrücken (siehe auch Lageplan Anlage 1 und Beschreibung der Messpunkte Tabelle 5).

### Messsystem „Kebe-System“

Die Aufzeichnung des zeitlichen Verlaufs der Schwinggeschwindigkeit  $v(t)$  erfolgte vor allem mit dem Messsystem „Kebe-System“. Bei diesem System sind die Messstellen über Kabel mit dem Messcomputer verbunden und die Schwingungen können in Echtzeit auf einem Bildschirm beobachtet werden. Die Messstellen des „Kebe-Systems“ werden in Anlage 1, Anlage 2 und Tabelle 5 mit „MP“ abgekürzt. Das „Kebe-System“ besteht aus folgenden Komponenten:

- Schwingungsmessstelle *SMK-4812* mit 3D-Geophonen der *Fa. Dr. Kebe Scientific Instruments GmbH*
- Messcomputer der *Fa. DSM* und 2 x 18-Bit AD Wandlerkarte (*Fa. National Instruments*) mit  $f = 1000$  Hz Abtastrate

Mit dem „Kebe-System“ wurden Zeitreihen mit einer Länge von bis zu 5 min aufgezeichnet.

### Messsystem „Vibras-System“

Im Nebenarm Geisenrücken wurde an den Messpunkten mit der Bezeichnung „VMP“ zusätzlich ein Messsystem vom Typ *VIBRAS 7003* der Firma *Walesch Electronic GmbH* eingesetzt („Vibras-System“). Dieses Messsystem ist eigentlich für Dauerüberwachungen im Rahmen von Beweissicherungsmaßnahmen konzipiert. Für die Schwingungsuntersuchung hat es zwei Nachteile: (1) Die maximale Länge der Zeitreihen beträgt 4,0 s. (2) Die Auflösung des „Vibras-Systems“ ist nicht

so hoch wie die Auflösung des „Kebe-Systems“. Die mit dem „Vibras-System“ aufgezeichneten Schwingungen liegen deshalb etwas höher, als die mit dem „Kebe-System“ aufgezeichneten Schwingungen (Abbildung 2 (A) und (C)). Im Rahmen der Messunsicherheit konnten jedoch mit beiden Apparaturen vergleichbare Schwingungssignale aufgezeichnet werden.

Das „Vibras-System“ wurde eingesetzt, weil es damit möglich ist, Sensoren über eine Funkstrecke anzubinden und so zeitgleich auf beiden Rheinseiten Schwingungen aufzuzeichnen.

Das „Vibras-System“ war so konfiguriert, dass an drei Messstellen vom Typ *MST 3004* mit dreiaxialen Geophonen nach manueller Triggerung Schwingungsereignisse aufgezeichnet wurden. Aufgezeichnet wurden u. a. je Zeitfenster (Dauer  $T_F = 5$  min):

- die Hüllkurve der Taktmaximalwerte des Vektors der Schwinggeschwindigkeit  $v_r(t)$  bei einer Taktzeit  $T_r = 3$  s
- der Größtwert des Vektors der Schwinggeschwindigkeit  $v_r$
- der Zeitverlauf der drei Richtungskomponenten der Schwinggeschwindigkeit  $v_i(t)$  beim Auftreten des Größtwertes  $v_i$  für die Zeitdauer  $T_i = 4,0$  s
- die Größtwerte der Richtungskomponenten der Schwinggeschwindigkeit  $v_i$
- die Hauptfrequenzen  $f_i$  der Größtwerte der drei Richtungskomponenten der Schwinggeschwindigkeit  $v_i$

Beide Messsysteme entsprechen den Anforderungen der DIN 4150 und der DIN 45669. Die Sensoren sind im Frequenzbereich von 1 Hz bis 315 Hz kalibriert.

### 5.1.2 Messdurchführung

Die Messung der Schwinggeschwindigkeit erfolgte an den in der Anlage 1 (Nebenarm Geisenrücken) und Anlage 2 (Lorchhauser Grund) dargestellten Messpunkten auf der Geländeoberkante im Freifeld. In der Tabelle 5 wird die Lage der Messpunkte beschrieben.

Die Messstellen wurden entlang der Rheinufer in unterschiedlichen Abständen zu den Baggerarbeiten aufgestellt. Durch die Anordnung der Messpunkte kann die Entfernungsabhängigkeit der Erschütterungen gemessen werden. Es zeigt sich eine Abnahme der Schwinggeschwindigkeit mit zunehmender Entfernung entsprechend der Gleichung (2) aus der DIN 4150-1:202212 [U3.1]. Diese Gleichung ist auch Grundlage der Regression für die Erschütterungsprognose (hier Abschnitt 5.3 Gleichung (4)).

Es konnte auch nachgewiesen werden, dass sich die Abschwächung der Erschütterung mit zunehmender Entfernung bis auf die jeweils andere Rheinseite fortsetzt. Dies war möglich, da in beiden Versuchsbereichen jeweils auf der linken und auf der rechten Rheinseite Schwingungsmessungen durchgeführt wurden. Im Nebenarm Geisenrücken wurde am 01.06.2022 ein Messsystem eingesetzt mit dem durch eine Funkverbindung zeitgleich auf beiden Rheinseiten Schwingungen aufgezeichnet werden konnten („Vibras-System“, „VMP“ in Tabelle 5).

**Tabelle 5:** Beschreibung der Messpunkte. Die Lage der Messpunkte kann der Anlage 1 (Nebenarm Geisenrücken) und der Anlage 2 (Lorchhauser Grund) entnommen werden. Die Bezeichnung der Messpunkte richtet sich nach dem verwendeten Messsystem: „MP“ steht für das „Kebe-System“, „VMP“ für das „Vibras-System“. Es werden die minimalen Entfernungen ( $R_{min}$ ) und die maximalen Entfernungen ( $R_{max}$ ) zum Baggerversuch angegeben.

Versuchsbereich	Rheinseite	Datum	Messpunkt	Fräsabschnitte „A“		Fräsabschnitte „B“	
				$R_{min}$	$R_{max}$	$R_{min}$	$R_{max}$
				in m			
Nebenarm Geisenrücken	links	31.05.22	MP 1	59	89	-	-
			MP 2	58	90	-	-
			MP 3	77	112	-	-
			MP 4	128	161	-	-
		01.06.22	MP 1	60	88	-	-
			MP 2	62	85	-	-
			MP 3	84	103	-	-
			MP 4	137	150	-	-
			MP 5	228	241	-	-
			VMP 1	60	88	-	-
			VMP 2	62	85	-	-
			VMP 3	182	237	-	-
	rechts	02.06.22	MP 1	205	224	-	-
			MP 2	220	242	-	-
			MP 3	289	312	-	-
			MP 4	300	323	-	-
Lorchhauser Grund	rechts	05.07.22	MP 1a	132	156	-	-
			MP 1b	140	164	-	-
			MP 1c	147	171	-	-
			MP 2	181	203	-	-
			MP 3	244	262	-	-
			MP 4a	187	209	-	-
	rechts	06.07.22	MP 1a	134	149	238	249
			MP 1d	184	198	166	175
			MP 2	181	195	167	175
			MP 3	243	256	169	177
			MP 4b	286	298	-	-
			MP 4c	404	415	272	278
	links	07.07.22	MP 1	-	-	335	347
			MP 2	-	-	329	341
			MP 3	-	-	156	167
			MP 4	-	-	340	351

Die sehr kleinen Schwingungen, die auf das Fräsen zurückzuführen sind, werden von Schwingungen überlagert, die ebenfalls im Umfeld der Messung auftreten. Dazu gehören z. B.

Erschütterungen durch vorbeifahrende Züge, LKWs und Autos. Durch Mitarbeitende der BAW wurden störende Einflüsse zeitgleich mit der Messung protokolliert.

## 5.2 Auswertung der Messdaten

Auf die vollständige Darstellung der zeitlichen Verläufe  $v_i(t)$  soll hier wegen der großen Zahl der Daten verzichtet werden. Alle aufgezeichneten Daten sind in der BAW, im Sachgebiet Baugrunddynamik, archiviert.

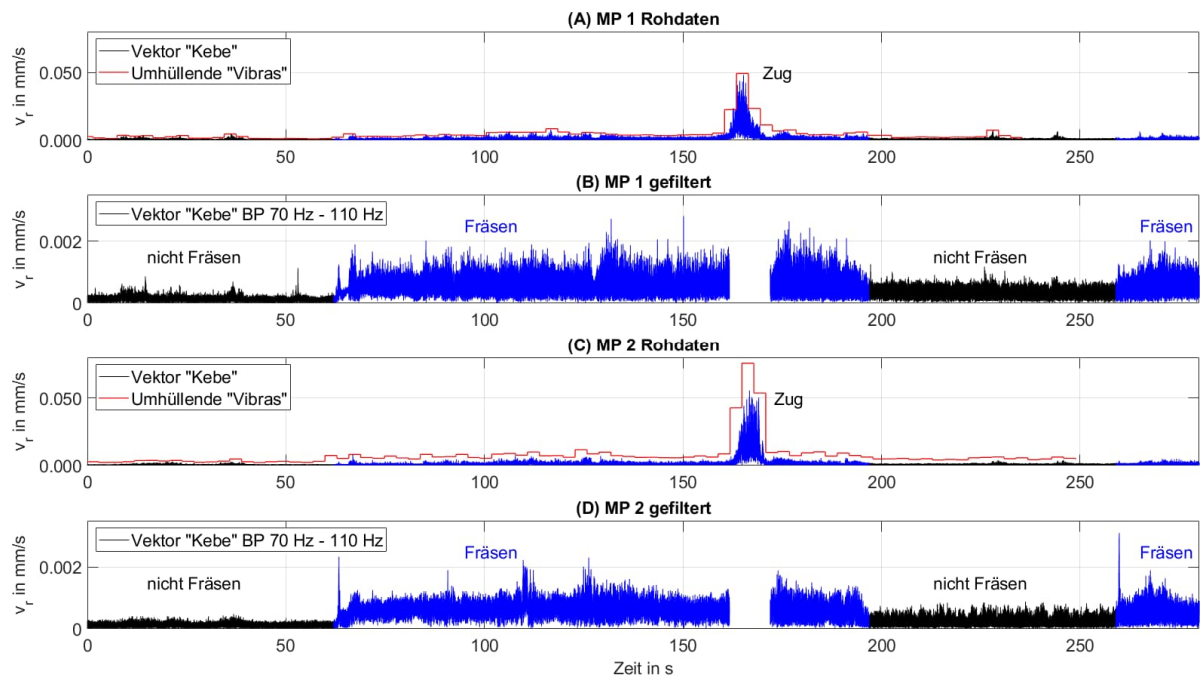
Für die Analyse der Ausbreitung der Erschütterungen im Boden (Freifelderschütterungen) werden je Messpunkt die Vektoren der Schwinggeschwindigkeit  $v_r(t)$  herangezogen (Gleichung (1)). Die Nutzung der Größe  $v_r(t)$  hat den Vorteil, dass sie einerseits unabhängig vom gewählten Koordinatensystem für die Aufstellung der Sensoren ist und andererseits wegen  $v_i \leq v_r$  immer auf der sicheren Seite für die Prognose von  $v_i$  liegt.

Vor Ableitung einer Prognosegleichung für die Baggerarbeiten müssen die störenden Einflüsse durch z. B. vorbeifahrende Züge, LKWs und Autos entfernt werden.

In Abbildung 2 wird dies exemplarisch für Daten gezeigt, die im Versuchsbereich „Nebenarm Geisenrücken“ auf der linken Rheinseite gemessen wurden (MP 1 und MP 2 im Lageplan Anlage 1).

Die Daten des „Kebe-Systems“ sind als Zeitreihen in blau und schwarz aufgetragen. Die Daten des „Vibras-Systems“ sind als rote Stufen eingezeichnet. Die Auflösung des „Vibras-Systems“ ist niedriger als die Auflösung des „Kebe-Systems“. Die mit dem „Vibras-System“ aufgezeichneten Daten liegen etwas höher, beide Systeme sind jedoch im Rahmen der Messgenauigkeit gut vergleichbar.

In den Rohdaten dominiert ein vorbeifahrender Zug (Abbildung 2 (A) und (C)). Erst wenn dieses Signal entfernt wird, sind die Schwingungen aus den Baggerarbeiten (Fräsen) erkennbar (Abbildung 2 (B) und (D)).



**Abbildung 2:** Datenbeispiel Nebenarm Geisenrücken, linke Rheinseite (MP 1 und MP 2), An- und Ausschaltvorgang der Fräse: In den Rohdaten dominiert ein vorbeifahrender Zug ((A) & (C)). Erst wenn dieses Signal entfernt wird, sind die Schwingungen aus den Baggerarbeiten (Fräsen) erkennbar ((B) & (D)). Zeitabschnitte in denen die Fräse abgeschaltet war sind schwarz dargestellt („Kebe-System“). Die Signale bei eingeschalteter Fräse sind blau hervorgehoben („Kebe-System“). Die Daten des „Vibras-Systems“ sind als rote Stufen eingezeichnet.

Während der Schwingungsmessungen wurde die Fräse mehrmals gezielt an- und ausgeschaltet, um die Interpretation der Ergebnisse zu erleichtern. Das Datenbeispiel in der Abbildung 2 zeigt einen solchen An- und Ausschaltvorgang. Zeitabschnitte in denen die Fräse abgeschaltet war sind schwarz dargestellt. Die Signale bei eingeschalteter Fräse sind blau hervorgehoben. Wie in Abbildung 2 (B) und (D) erkennbar, waren die Fräsarbeiten auf der linken Rheinseite im Nebenarm Geisenrücken durch einen leichten Anstieg der Schwingungen messbar. In allen anderen Versuchsbereichen (Nebenarm Geisenrücken rechte Rheinseite, Lorchhauser Grund beidseitig), konnte aufgrund der größeren Entfernung kein Einfluss der Baggerarbeiten festgestellt werden.

Die dominierende Frequenz der Fräse liegt bei  $f = 89 \text{ Hz}$  (Abbildung 3).

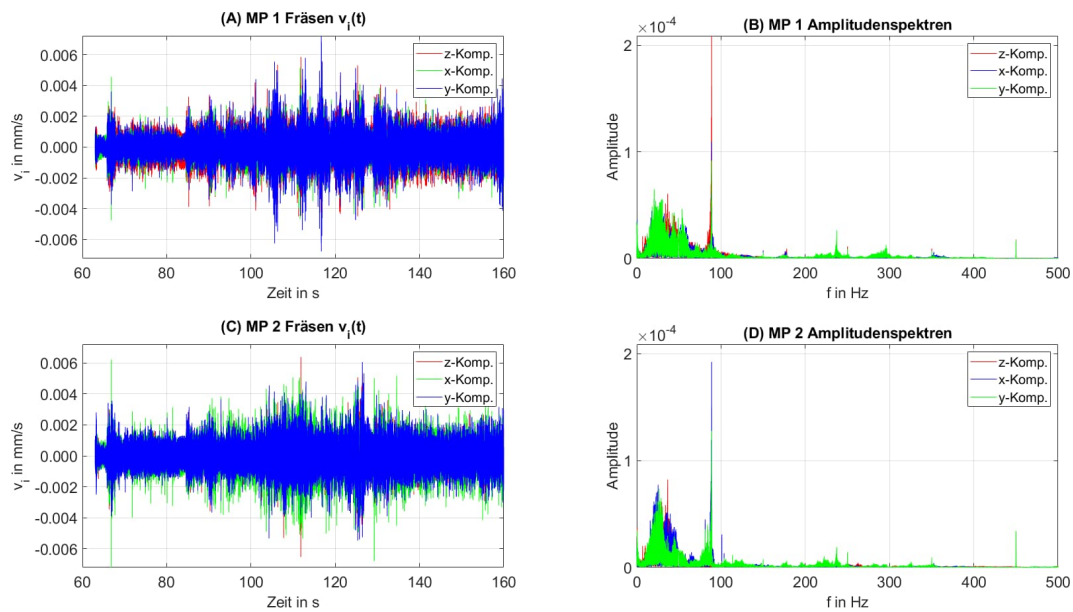


Abbildung 3: Datenbeispiel Nebenarm Geisenrücken, linke Rheinseite (MP 1 und MP 2): Zeitverlauf der Schwingungsgeschwindigkeit ((A) & (C)) und zugehörige Amplitudenspektren ((B) & (D)).

Das Signal der größten aufgezeichneten Schwingungsgeschwindigkeit im gesamten Messzeitraum ( $v_{r,max} = 0,016 \text{ mm/s}$ ) ist exemplarisch in der Anlage 3 dargestellt.

### 5.3 Ableitung einer Prognosegleichung für die Erschütterungsprognose

Im Nebenarm Geisenrücken konnten 147 Zeitverläufe von Schwingungssignalen für die Prognose gewonnen werden, im Lorchhauser Grund waren es 231 Zeitverläufe. Beispiele für die zeitabhängigen Schwingungssignale sind z. B. in Abbildung 2, Abbildung 3 oder Anlage 3 dargestellt. Die Schwingungssignale wurden im Nebenarm Geisenrücken öfters durch Störungen überlagert, die nicht herausgefiltert werden konnten, sodass hier weniger Zeitverläufe zur Verfügung stehen.

Für die Ableitung der Prognosegleichung werden pro Datei nur die Größtwerte („Betragsmaximalwerte“) der Vektoren der Schwingungsgeschwindigkeit  $v_{r,max}$  herangezogen (Gleichung (2)). Durch Protokollierung vor Ort wurde sichergestellt, dass die hier ausgewerteten Erschütterungswerte auch tatsächlich durch die Baggerarbeiten verursacht wurden (Abschnitt 5.2).

Die Fräsarbeiten waren nur auf der linken Rheinseite im Nebenarm Geisenrücken durch einen leichten Anstieg der Schwingungen messbar. In allen anderen Versuchsbereichen (Nebenarm Geisenrücken rechte Rheinseite, Lorchhauser Grund beidseitig), konnte aufgrund der größeren Entfernung kein Einfluss der Baggerarbeiten festgestellt werden. Aus diesem Grund basiert die Prognose nur auf Messdaten aus dem Nebenarm Geisenrücken.

In der Abbildung 4 sind die Betragsmaximalwerte der Freifeldschwingungen  $v_{r,max}$  im Nebenarm Geisenrücken in Abhängigkeit der Entfernung  $R$  zwischen Messpunkt und der Erschütterungsquelle dargestellt. Die Betragsmaximalwerte der Freifeldschwingungen im Lorchhauser Grund sind in der Anlage 4 abgelegt.

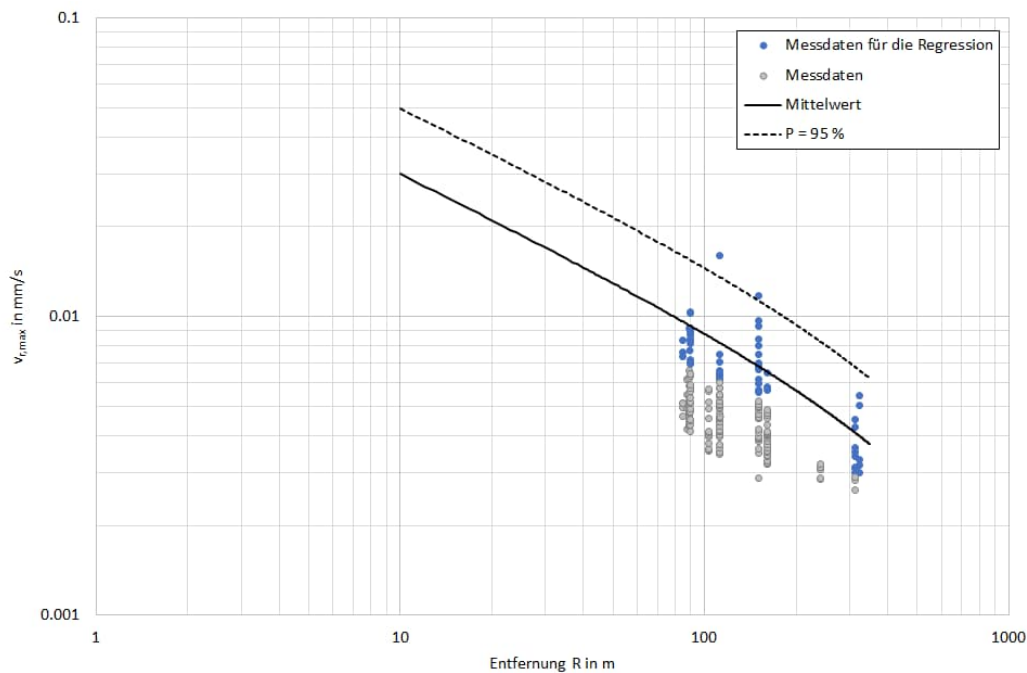


Abbildung 4: Nebenarm Geisenrücken: während der Baggararbeiten gemessene Betragsmaximalwerte  $v_{r,max}$ . Dargestellt sind auch die Regression nach Gleichung (4) und die obere Grenze des Vertrauensbereichs ( $P = 95 \%$ , Gleichung (5)).

Für die Prognose werden wiederum nur die größten gemessenen Betragsmaximalwerte herangezogen (56 Messdaten). Diese sind in der Abbildung 4 blau markiert. In Grau sind zur vollständigen Darstellung der Ergebnisse auch die Betragsmaximalwerte eingezeichnet, die nicht für die Regression verwendet wurden.

Während der Schwingungsmessungen wurden die in der Anlage 1 und Anlage 2 eingezeichneten Flächen bearbeitet. Für die Regression wird die Erschütterung der größten Entfernung im Bearbeitungsbereich zugeordnet (siehe auch Tabelle 5). Die Abschätzung liegt bezüglich der Entfernung somit auf der sicheren Seite.

Für die Abnahme der Schwinggeschwindigkeit der Freifeldschwingungen mit zunehmender Entfernung ergibt sich folgender Regressionsansatz (Abbildung 4 durchgezogene Linie):

$$v_B = 0,03 \cdot \left( \frac{R}{10 \text{ m}} \right)^{-0,5} e^{-0,0009(R-10 \text{ m})} \quad (4)$$

$v_B$  Schwinggeschwindigkeit am Boden in der Entfernung  $R$   
 $R$  Entfernung von der Erschütterungsquelle

Für die obere Grenze des Vertrauensbereiches mit der statistischen Sicherheit  $P = 95 \%$  gilt (Abbildung 4 gestrichelte Linie):

$$v_{B,95\%} = 1,66 \cdot v_B \quad (5)$$

## 6 Bewertung der Ergebnisse

Die Bewertung der Ergebnisse kann von den Versuchsbereichen „Nebenarm Geisenrücken“ und „Lorchhauser Grund“ auf das gesamte Projektgebiet übertragen werden, da während des Baggerversuchs die für die obere Gebirgsstrecke typischen Baugründe untersucht wurden.

Erschütterungen aus Baggerarbeiten, die über die alltäglichen, im Umfeld erzeugten Erschütterungen hinausgehen, konnten nicht festgestellt werden.

Mit den Gleichungen (4) und (5) lassen sich die zu erwartenden Freifeldschwingungen auf der Geländeoberkante abschätzen. Bei der Übertragung der Freifeldschwingungen ( $v_B$ ) auf das Fundament von Bauwerken ( $v_F$ ) und von dort weiter auf das Obergeschoss ( $v_{OG}$ ) und die Decken ( $v_D$ ) werden diese in ihrer Größe verändert.

Die durch die Fräsarbeiten erzeugten Erschütterungen sind mit  $f = 89$  Hz vergleichsweise hochfrequent. Sie werden auf im Fels gegründete Bauwerke ohne nennenswerte Abschwächung übertragen. Bei Bauwerken, die auf Boden (z. B. Sand) gegründet sind, erfolgt wegen der hohen Frequenzen eine Verringerung der Erschütterungsgröße infolge Materialdämpfung.

### 6.1 Bewertung der Einwirkungen auf bauliche Anlagen

Durch die sehr kleinen Schwingungen (Abbildung 4) mit einer relativ hoher Frequenz ( $f = 89$  Hz) werden auch bei einem ungünstigen Übertragungsverhalten die Anhaltswerte der DIN 4150-3:2016-12 ([U3.3], Abschnitt 4.1) sicher eingehalten. Schäden an anliegenden baulichen Anlagen und erdverlegten Rohrleitungen sind ausgeschlossen.

### 6.2 Bewertung der Einwirkungen auf den Boden im Gründungsbereich von Bauten

Während der Baggerarbeiten wird die Grenzschrwinggeschwindigkeit von  $v_{r,max} = 6$  mm/s an der Geländeoberkante (GOK) bei der die Setzungsbeträge der GOK unter  $S = 1$  mm bleiben nicht überschritten ([U2.2], Abschnitt 4.2). Ein mögliches Schadenspotenzial durch Setzungen wird ausgeschlossen.

### 6.3 Bewertung der Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden

Die Beurteilung von zeitlich begrenzten Erschütterungseinwirkungen durch Baumaßnahmen erfolgt weitgehend baugebietsunabhängig in drei Stufen (untere Anhaltswerte  $A_u(I)$  bis  $A_u(III)$ ) und einem zusätzlichen oberen Anhaltswert  $A_o$ . Je nachdem welche Stufen überschritten werden, müssen bestimmte Maßnahmen zum Schutz der Anwohner getroffen werden ([U3.2], Abschnitt 4.3).

In der Abbildung 5 ist die prognostizierte maximale bewertete Schwingstärke  $KB_{Fmax}$  (Gleichung (3)) für die obere Grenze des Vertrauensbereichs ( $P = 95\%$ ) zusammen mit den Anhaltswerten der DIN 4150-2:1999-06 abgebildet. Für dieses Beispiel wurden ungünstige Übertragungsfaktoren angesetzt:

$$v_F = 1,0 \cdot v_B \quad (6)$$

$$v_{OG} = 4,7 \cdot v_F \quad (7)$$

$$v_D = 16 \cdot v_F \quad (8)$$

Die Übertragungsfaktoren basieren auf der jahrelangen Sammlung von Messergebnissen von Boden- und Bauwerksschwingungen in der BAW für erschütterungsintensive Bauverfahren und deren statistische Auswertung. In einem Forschungsvorhaben wurde das Übertragungsverhalten Boden – Bauwerk und Boden – Bauteil herausgearbeitet [U2.3][U4.1].

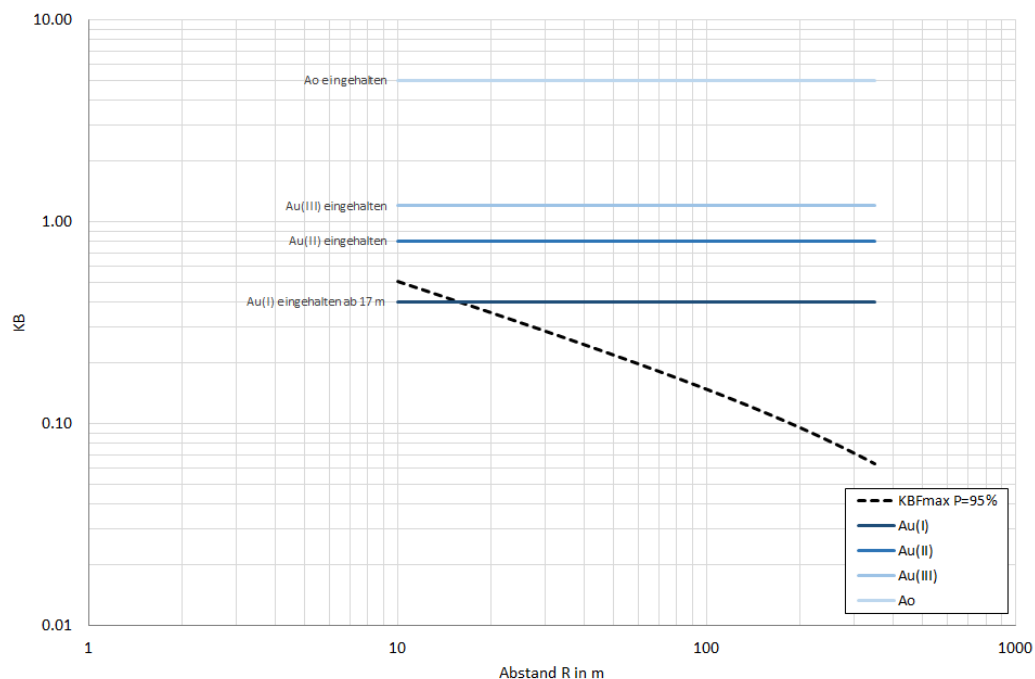


Abbildung 5: Erschütterungseinwirkung auf Menschen in Wohngebäuden: prognostizierte maximale bewertete Schwingstärke  $KB_{Fmax}$  bei der oberen Grenze des Vertrauensbereichs ( $P = 95\%$ ) und Anhaltswerte der DIN 4150-2:1999-06.

Ab einem Abstand von  $R \geq 17$  m kann der untere Anhaltswert der Stufe I  $A_u(I)$  sicher eingehalten werden.

Die durchgeführten Baggerversuche und die geplanten Baggararbeiten haben einen Abstand von deutlich mehr als 17 m zu Gebäuden.

Es ist somit nicht mit erheblichen Belästigungen von Menschen in Gebäuden zu rechnen.

Auch bei besonders schutzwürdigen Gebieten (Objekten) wie z. B. Krankenhäusern, ist durch die sehr kleinen Schwingungen und durch die großen Abstände der Baggararbeiten zum Ufer nicht mit einer erheblichen Belästigungen zu rechnen.

## **7 Schlussfolgerung und Empfehlungen**

Die bei dem Baggerversuch eingesetzte Frästechnik stellt aus Sicht des Erschütterungsschutzes ein sehr schonendes Verfahren dar. Bei einem weiteren Einsatz dieser Technik ist nicht mit Einwirkungen auf anliegende Schutzgüter oder Menschen in Gebäuden im Sinne der DIN 4150 zu rechnen.

Beweissicherungsmaßnahmen wie z. B. die Dokumentation bestehender Schäden an anliegenden Gebäuden oder der Nachweis der tatsächlich auftretenden Erschütterungen sind nicht notwendig.

Das Sachgebiet Baugrunddynamik steht für Rückfragen und Beratungen gerne zur Verfügung.

Bundesanstalt für Wasserbau  
Karlsruhe, 16.06.2023

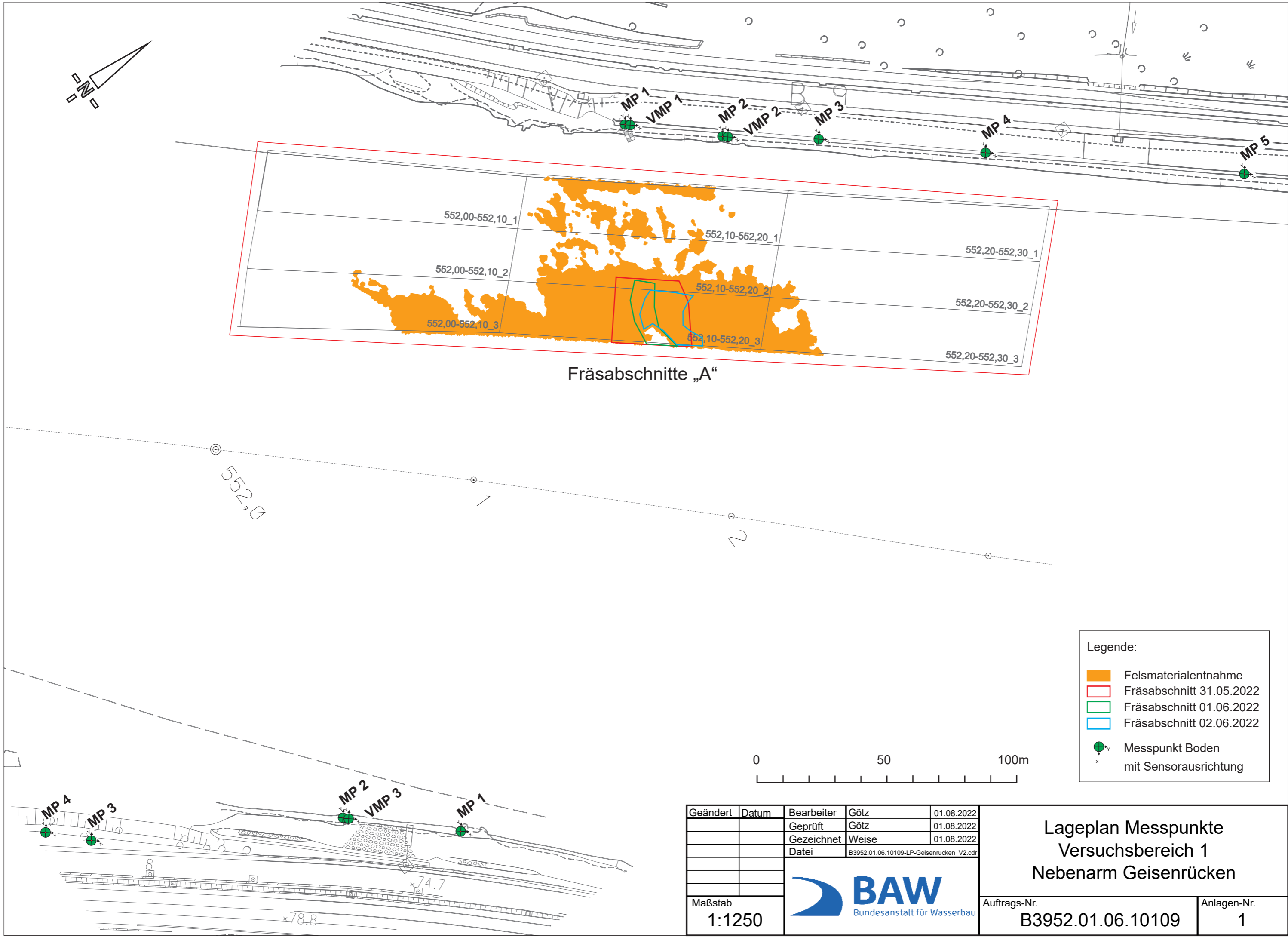
Im Auftrag

*gez. Götz*

Dr.-Ing. Julia Götz

## **Literaturverzeichnis**

Erkat ® (2023): Sortiment ER-Fräsen, ER 3000. Online verfügbar unter  
<https://www.erkat.com/de/products/er/er3000>, zuletzt geprüft am 06.06.2023.



Fräsabschnitte „A“

Legende:

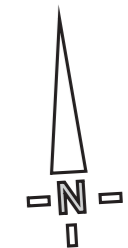
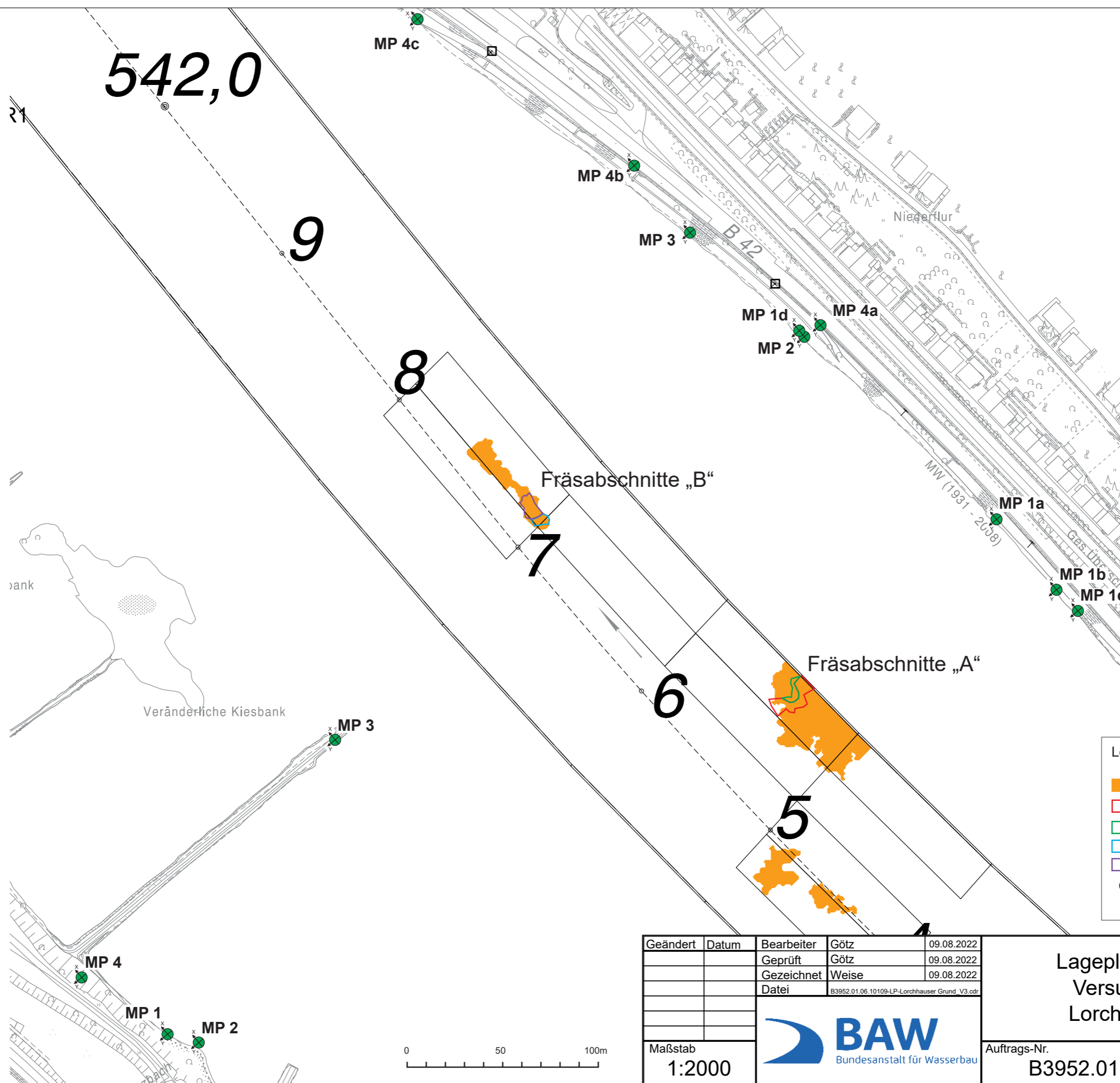
- Felsmaterialentnahme
- Fräsabschnitt 31.05.2022
- Fräsabschnitt 01.06.2022
- Fräsabschnitt 02.06.2022
- x

y

 Messpunkt Boden mit Sensorausrichtung

Geändert	Datum	Bearbeiter	Götz	01.08.2022
		Geprüft	Götz	01.08.2022
		Gezeichnet	Weise	01.08.2022
		Datei	B3952.01.06.10109-LP-Geisenrücken_V2.cdr	
		<div><b>BAW</b> Bundesanstalt für Wasserbau</div>		
Maßstab				
1:1250				


Lageplan Messpunkte Versuchsbereich 1 Nebenarm Geisenrücken	
Auftrags-Nr. B3952.01.06.10109	Anlagen-Nr. 1



Legende:

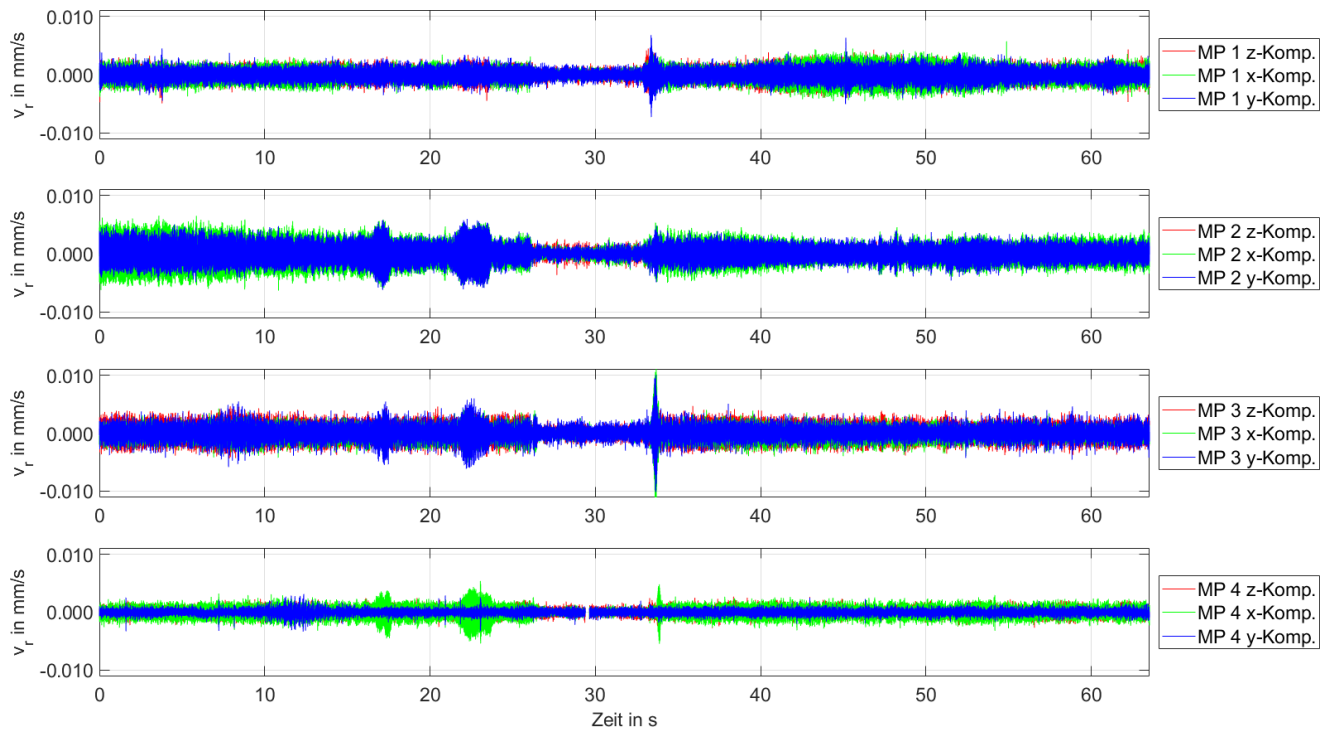
- Felsmaterialentnahme
- Fräsabschnitt 05.07.2022
- Fräsabschnitt 06.07.2022
- Fräsabschnitt 06.07.2022
- Fräsabschnitt 07.07.2022
- x

 Messpunkt Boden mit Sensorausrichtung

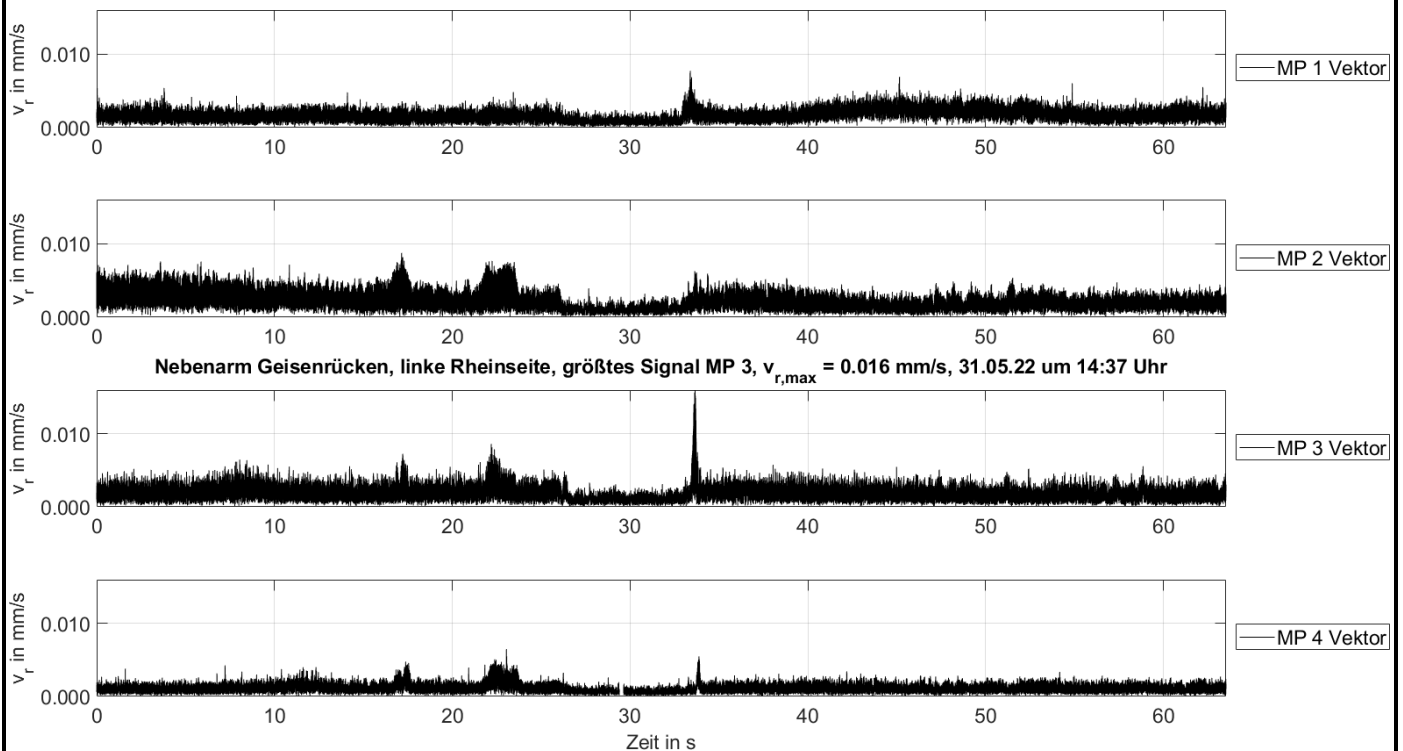
Geändert	Datum	Bearbeiter	Götz	09.08.2022
		Geprüft	Götz	09.08.2022
		Gezeichnet	Weise	09.08.2022
		Datei	B3952.01.06.10109-LP-Lorchhauser Grund_V3.cdr	
		<div><div><b>BAW</b> Bundesanstalt für Wasserbau</div></div>		
Maßstab				
1:2000				


Lageplan Messpunkte Versuchsbereich 2 Lorchhauser Grund	
Auftrags-Nr. B3952.01.06.10109	Anlagen-Nr. 2

# Signal, 31.05.2022 14:47 Uhr, Einzelkomponenten



# Signal, 31.05.2022 14:47 Uhr, Vektoren

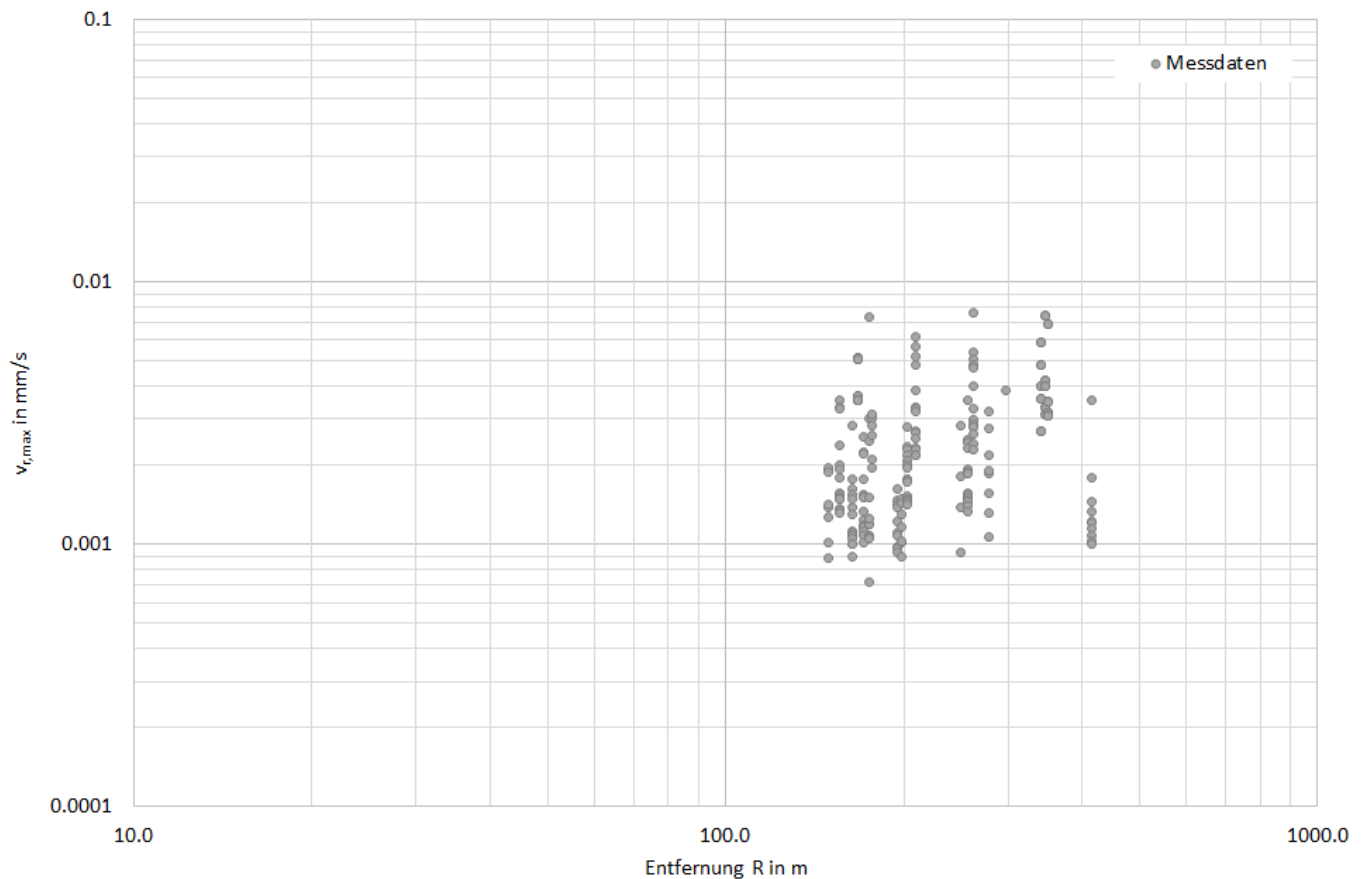



Geändert	Datum	Bearbeiter	Götz	20.04.23
		Geprüft		
		Gezeichnet		
		Datei	B3952.01.06.10109_Signal.docx	
		<div><b>BAW</b> Bundesanstalt für Wasserbau</div>		
Maßstab				

Abladeoptimierung Mittelrhein  
 Baggerversuch im Fels  
 Beispielsignal  
 „Kebe-System“

Auftrags-Nr.	Anlagen-Nr.
B3952.01.06.10109	3

Lorchhauser Grund: während der Baggararbeiten gemessene Betragsmaximalwerte  $v_{r,max}$



Geändert	Datum	Bearbeiter	Götz	20.04.23
		Geprüft		
		Gezeichnet		
		Datei	B3952.01.06.10109_Lorchhausen.docx	
		<div><div><div>BAW</div><div>Bundesanstalt für Wasserbau</div></div></div>		
Maßstab				

**Abladeoptimierung Mittelrhein  
Baggerversuch im Fels  
Lorchhauser Grund  
Betragsmaximalwerte**

Auftrags-Nr. <b>B3952.01.06.10109</b>	Anlagen-Nr. <b>4</b>
--	-------------------------



Kußmaulstraße 17 · 76187 Karlsruhe  
Tel. +49 (0) 721 9726-0 · Fax +49 (0) 721 9726-4540

[www.baw.de](http://www.baw.de)

Wedeler Landstraße 157 · 22559 Hamburg  
Tel. +49 (0) 40 81908-0 · Fax +49 (0) 40 81908-373