

# **Planfeststellungsverfahren**

**für den**  
**Ersatz der beiden Kleinen Schleusenammern und**  
**Anpassung der Vorhäfen in Kiel-Holtenau**

**VORHABENTRÄGER:**

**WASSERSTRASSEN- UND SCHIFFFAHRTSAMT KIEL-HOLTENAU**

**SCHLEUSENINSEL 2**

**24159 KIEL-HOLTENAU**

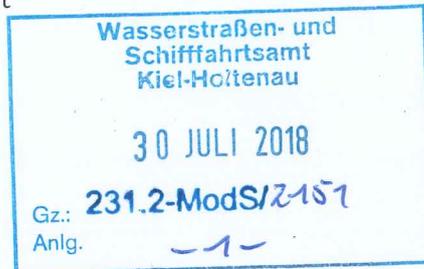


## **5.2.2**

# **Umschlagstelle Süd**

Bundesanstalt für Wasserbau · Postfach 21 02 53 · 76152 Karlsruhe

Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt  
Kiel Holtenau  
Herrn Frank Bullerkist  
Schleuseninsel 2  
24159 Kiel



*R*

Ansprechpartner/in:  
Dr.-Ing. Julia Götz  
Geschäftszeichen:  
G1/2111  
Telefon: +49 (0)721 9726-2606  
Telefax: +49 (0)721 9726-4540  
julia.goetz@baw.de  
www.baw.de

Ihr Zeichen:  
231.2-ModS/2151

Datum: 26.07.2018

## Grundinstandsetzung der Kleinen Schleuse Kiel Holtenau, NOK-km 97,2 – 98,6

Hier: Stellungnahme zu Auswirkungen von Erschütterungen beim Bau der Umschlagstelle  
Kiel-Wik

### 1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Das Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Kiel-Holtenau plant den Ersatzneubau der kleinen Schleuse Kiel-Holtenau. Im Vorfeld der Baumaßnahme soll ein dauerhafter Anleger zur Baustellenandienung errichtet werden. Die geplante Umschlagstelle befindet sich im Bereich des Binnenhafens im Ortsteil Kiel-Wik. Der Bau der Umschlagstelle umfasst das Einbringen einer umlaufenden Uferspundwand und die Herstellung einer schrägen Rückverankerung bzw. die horizontale Festmachung an die zum Teil schon bestehende Uferwand. Der Raum hinter der Spundwandkonstruktion wird verfüllt und der eingebrachte Boden im Anschluss verdichtet.

In der Umgebung der zu errichtenden Umschlagstelle befinden sich mehrere bauliche Anlagen der WSV und Dritter. Im Vorfeld der Baumaßnahme sollen deswegen die Auswirkungen von Erschütterungen infolge von Bauarbeiten auf die anliegenden Bauwerke und Menschen in Gebäuden untersucht werden. Die Bundesanstalt für Wasserbau wurde beauftragt die Auswirkungen von Erschütterungen im Rahmen der oben genannten Baumaßnahme zu bewerten [U1.1].

Die vorliegende Stellungnahme enthält die Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen zur Prognose von Erschütterungsimmissionen infolge von Bauarbeiten für die betroffenen Wirkräume sowie deren Bewertung hinsichtlich der angemessenen Berücksichtigung des Erschütterungsschutzes im Rahmen des gesetzlichen Immissionsschutzes.

## 2 Unterlagen

Folgende Unterlagen wurden für die Bearbeitung verwendet:

### [U1] Schriftverkehr

- [U1.1] Auftragschreiben des Wasserstraßen- und Schifffahrtsamts Kiel-Holtenau, Az.: 231.2-ModS/2151 vom 20.02.2017
- [U1.2] E-Mails vom WSA Kiel-Holtenau, AW: Stellungnahme Erschütterungen Umschlagstelle Kiel-Wik vom 19.04.2018 und 25.04.2018.

### [U2] Pläne

- [U2.1] Lageplan mit Neubau (Vorabzug Planfeststellung), Maßstab 1:2000, Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Kiel-Holtenau, Stand 22.05.2017
- [U2.2] Bauwerksplan Anleger Kiel-Wik (Vorabzug Planfeststellung), Maßstab 1:500, Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Kiel-Holtenau, Stand 22.05.2017
- [U2.3] Lageplan Leitungen (Bestandszeichnung), Maßstab 1:500, Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Kiel-Holtenau, Stand 14.11.2016
- [U2.4] Baugrundlängsschnitt Umschlagstelle Kiel-Wik, Maßstab 1:100 und 1:1000, Bundesanstalt für Wasserbau, Stand 31.01.2018
- [U2.5] Bohr- und Sondierergebnisse Umschlagstelle Kiel-Wik, Maßstab 1:100 und 1:1000, Bundesanstalt für Wasserbau, Stand 31.01.2018
- [U2.6] Lageplan, Hochdruckgasleitung unterhalb der Uferstraße in Kiel, Maßstab 1:150, SWKiel Netz GmbH, Stand 18.04.2018

### [U3] Berichte

- [U3.1] Erläuterungsbericht zur Vorplanung Anleger Kiel-Wik, Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Kiel-Holtenau, aufgestellt durch WTM Engineers am 19.05.2017
- [U3.2] Statistische Auswertung von Erschütterungsemissionen, FuE-Abschlussbericht, BAW-Nr. A39520570002, aufgestellt durch die Bundesanstalt für Wasserbau am 24.11.2015
- [U3.3] Setzungen von Sanden bei Schwingungsanregung, FuE-Abschlussbericht, BAW-Nr. A39520570001, aufgestellt durch die Bundesanstalt für Wasserbau am 28.11.2012

### [U4] Normen/Merkblätter

- [U4.1] DIN 4150-1, Erschütterungen im Bauwesen – Teil 1: Vorermittlung von Schwingungsgrößen, Beuth Verlag GmbH Berlin, Ausgabe Juni 2001
- [U4.2] DIN 4150-2, Erschütterungen im Bauwesen – Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden, Beuth Verlag GmbH Berlin, Ausgabe Juni 1999
- [U4.3] DIN 4150-3, Erschütterungen im Bauwesen – Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen, Beuth Verlag GmbH Berlin, Ausgabe Dezember 2016

[U4.4] Merkblatt: Einteilung des Baugrunds in Homogenbereiche nach VOB/C (MEH), Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe, Ausgabe August 2017

### 3 Baumaßnahme und Schutzgüter

Die Errichtung der Umschlagstelle Kiel-Wik ist bei NOK-km 97,6 geplant (siehe Anlage 1) [U2.1]. Für die Umschlagstelle kommt eine rückverankerte, hinterfüllte Spundwandkonstruktion zum Einsatz. Im überwiegenden Bereich der Umschlagstelle ist das Ufer geböschst ausgeführt. Im Westen schließt die geplante Umschlagstelle an eine bestehende Uferwand an [U2.2].

Die Abmessungen der Umschlagstelle sind mit 10 m Breite und ca. 49 m Länge vorgegeben [U3.1]. Der wasserseitige Abschluss wird durch eine umlaufende Spundwand gebildet, welche durch einen Stahlbetonholm nach oben abgeschlossen wird. Im Regelbereich soll je nach Wassertiefe eine Wellenspundwand als auch eine kombinierte Spundwand zur Ausführung kommen. Die schräge Rückverankerung der Umschlagstelle ist mit Verpresspfählen oder Ramppfählen geplant. Die Wahl der Schrägverankerung ist bisher nicht weiter spezifiziert. Im Bereich der Bestandsuferwand ist eine horizontale Festmachung am Bestand vorgesehen.

Im Rahmen der Baumaßnahme sind folgende erschütterungsintensive Bauverfahren zu betrachten:

- Rammarbeiten beim Einbringen der umlaufenden Uferspundwand (Spundwände mit Längen  $L \geq 10$  m)
- Schrägpfahlrammung zur Herstellung der schrägen Rückverankerung (Stahlpfähle mit Längen  $L \geq 10$  m)
- Bodenverdichtung mit leistungsstarken Vibrationsverfahren im Bereich der Spundwandhinterfüllung

Die Herstellung von Verpresspfählen sowie die Baugrundverdichtung mit kleinen Rüttelplatten (maximale Fliehkraft  $F \leq 25$  kN; [U4.1]) werden nach vorliegenden Erfahrungen als erschütterungsarm eingestuft. Überschreitungen der zulässigen Schwingungsanhaltswerte der DIN 4150-2 und DIN 4150-3 sowie durch Erschütterungen verursachte schädliche Setzungen anliegender Bauten sind bei sachgemäßer Ausführung der Verfahren nicht zu erwarten.

In Tabelle 1 sind die minimalen Abstände der erschütterungsintensiven Bauverfahren zu den jeweils nächstliegenden Bauwerken [U2.1, U2.2] angegeben. Die aufgeführten Bauwerke können von Erschütterungen betroffen sein und stellen hinsichtlich deren Einwirkung Schutzgüter dar. Die Lage der bewerteten Schutzgüter ist in Anlage 1 dargestellt.

Tabelle 1: Minimale Abstände zwischen nächstliegenden Schutzgütern und erschütterungsintensiven Bauverfahren

Bauwerksart	Titel	Bauwerk	Einbringen Spundwand <sup>1)</sup>	Schrägpfahl- rammung <sup>2)</sup>	Bodenver- dichten <sup>3)</sup>
			R in m	R in m	R in m
Massivbauten	M1	Bestandsuferwand	0	5	0
	M2	Schleusenleitwerk Süd	38	38	38
	M3	Schleusenleitwerk Mitte	90	90	90
	M4	Aussichtsplattform	143	143	143
Gewerblich genutzte Gebäude, Industriebauten und ähnlich strukturierte Bauten	G1	Maschinenbaulager	60	60	60
	G2	Elektrizitätswerk	95	95	95
	G3	Umspannstation	95	95	95
	G4	Lagerhalle (Am Kiel Kanal 44)	109	103	103
	G5	Industriegebäude (Am Kiel Kanal 44)	114	109	109
	G6	Zollamt	119	119	119
	G7	Industriegebäude (Am Kiel Kanal 11)	124	133	124
	G8	Industriegebäude (Am Kiel Kanal 21-23)	138	147	138
	G9	Industriegebäude (Maklerstraße 1)	141	141	141
Rohrleitungen	R1	Gashochdruckleitung 8 bar (erdverlegt)	40	40	40
	R2	Rohrleitung (überirdisch)	80	80	80

<sup>1)</sup> – minimaler Abstand des Schutzgutes zur nächstliegenden Spundwand

<sup>2)</sup> – minimaler Abstand des Schutzgutes zum nächstliegenden Schrägpfahlfuß

<sup>3)</sup> – minimaler Abstand des Schutzgutes zum nächstliegenden Bodenverdichtungsareal

### 3 Baugrund

Im Zuge der Baugrunderkundung wurden im Bereich des Anlegers fünf vereinfachte Hauptbodenschichten angetroffen. Gemäß [U2.4 und U2.5] wird folgender Bodenaufbau angesetzt:

- Auffüllungen (Schicht 1)
- Beckenton und -schluff (Schicht 2)
- Geschiebemergel (Schicht 3) mit eingelagertem Beckensand (Schicht 4)
- Pleistozäne Sande (Schicht 5)

Die Auffüllungen (Schicht 1) wurden im landseitigen Teil des Baufelds mit einer Schichtmächtigkeit von ca. 2 m erbohrt. Die Schichtunterkante liegt zwischen ca. 1,9 m und -0,5 mNHN. Oberflächennah bestehen die erbohrten Böden aus einer Mischung von Mutterboden und Feinsand mit schluffigen und schwach kiesigen Beimengungen, z. T. sind die Böden auch torfig humos. Unterlagert werden diese Böden von einer bindigen Auffüllung aus umgelagerten Beckenton und -schluff sowie Geschiebemergel

in Wechsellagerung. Nach den Ergebnissen der Drucksondierung liegt der Spitzendruck  $q_c$  zwischen 1 MPa und 5 MPa.

Die Auffüllungen werden von einer bis zu 4,5 m mächtigen Schicht aus Beckenton und -schluff unterlagert (Schicht 2). Die Basis dieser Schicht liegt zwischen ca. -1,0 m und -5,0 mNHN. Der erkundete Bohrabschnitt entspricht einem stark feinsandigen bis schwach mittelsandigen Ton, wobei Ton und Sandanteile variieren. Die Konsistenz der erkundeten Böden liegt zwischen steif und halbfest. Die Drucksondierung zeigt Spitzendrücke von  $2 \text{ MPa} \leq q_c \leq 13 \text{ MPa}$ . Die undrainede Scherfestigkeit wurde zu  $c_u = 150 - 400 \text{ kN/m}^2$  ermittelt.

Unterhalb der Beckentone/-schluffe steht ein Bereich aus Geschiebemergel (Schicht 3) mit eingelagerten Beckensanden (Schicht 4) an. Die Gesamtmächtigkeit des Bereichs beträgt zwischen 13,5 m und 20 m. Wasserseitig ist der anstehende Geschiebemergel von einer ca. 80 cm mächtigen Schlickauflage überlagert. Die Unterkante des Geschiebemergels liegt auf der Wasserseite bei etwa -18,5 mNHN. Landseitig wurde die Unterkante bei -20,8 mNHN erbohrt. Der angetroffene Mergel entspricht überwiegend einem sandigen bis stark sandigen Ton mit kiesigen Nebenanteilen und steifer bis halbfester Konsistenz. Die Sondierwiderstände  $q_c$  reichen von 3 MPa oberflächennah bis zu 18 MPa in der Tiefe. Die undrainierte Scherfestigkeit  $c_u$  beträgt zwischen 70 – 250 kN/m<sup>2</sup>.

Die Mächtigkeit der eingelagerten Beckensande (Schicht 4) variiert zwischen 4 m und 6 m. Die Oberkante der Sande liegt zwischen -11,5 mNHN auf der Landseite und -12,0 mNHN auf der Wasserseite. Die erbohrten Böden bestehen zum Großteil aus Feinsanden mit mittelsandigen und schluffigen Nebenanteilen sowie Kohleresteeinlagerungen, wobei im oberen Schichtbereich auch feinsandige Mittelsande mit schwach kiesigen Beimengungen auftreten. Nach den Ergebnissen der Drucksondierungen sind die Beckensande durchweg mitteldicht gelagert. Im Zuge der Drucksondierung wurden Spitzendrücke zwischen ca.  $q_c = 7 \text{ MPa}$  und  $q_c = 15 \text{ MPa}$  registriert.

Der Übergang zwischen Geschiebemergel und den unterlagernden Pleistozänen Sanden (Schicht 5) ist örtlich durch Steinhindernisse gekennzeichnet. Auf Grund seiner geologischen Entstehungsgeschichte ist innerhalb des Geschiebemergels mit Hindernissen in Form von Steinen bis hin zu Blockgröße zu rechnen. Vermehrt treten diese im Übergangsbereich zu den unterlagernden Sanden auf. Direkt unterhalb des Übergangsbereichs bestehen diese Sande meist aus schwach feinsandigen bis feinsandigen und schwach grobsandigen Mittelsanden, z. T. auch mit schwach kiesigen Nebenanteilen sowie Kohleresteeinlagerungen. Unter Berücksichtigung der registrierten Spitzendrücke  $q_c = 45 \text{ MPa}$  können die Sande als dicht bis sehr dicht gelagert eingestuft werden.

Die bautechnischen Eigenschaften der beschriebenen Hauptbodenschichten können Tabelle 2 entnommen werden. Die Klassifizierung der Hauptbodenschichten erfolgte unter zu Hilfenahme des Merkblatts zur Einteilung des Baugrunds in Homogenbereiche nach Abschnitt 4.4 Ramm- Rüttel-, und Pressarbeiten [U4.4].

Tabelle 2: Bautechnische Eigenschaften der Hauptbodenschichten

Hauptschicht	Konsistenz	Lagerungsdichte	Rammpbarkeit
Auffüllungen (Schicht 1)	steif	-	mittelschwer
Beckenton/-schluff (Schicht 2)	steif-halbfest	-	mittelschwer-schwer
Geschiebemergel (Schicht 3)	steif-halbfest	-	mittelschwer-schwer
Beckensand (Schicht 4)	-	mitteldicht	mittelschwer
Pleistozäne Sande (Schicht 5)	-	dicht-sehr dicht	schwer-sehr schwer

#### 4 Erschütterungsprognose

Der Absetzhorizont für die Spundwände liegt voraussichtlich innerhalb des Geschiebemergelhorizonts oder innerhalb einer der Sandschichten (Schicht 3 oder Schicht 4). Gleiches gilt für die Eindringung der Rammfähle. Für die Prognose der Erschütterungen werden dementsprechend folgende Bauverfahren geprüft:

- Schlagrammung bei schwerer Rammpbarkeit beim Einbringen der umlaufenden Uferspundwand sowie zur Herstellung der schrägen Rückverankerung
- Bodenverdichtung mit Vibrationsverfahren im Bereich der Spundwandhinterfüllung (Fliehkräfte  $F > 25$  kN)

Unter der Verwendung von Einbringhilfen wäre auch das Einrütteln der Rammelemente denkbar. Laut dem aktuellen Planungsstand liegen hierzu allerdings keine konkreten Angaben vor. Die Ausführung von Vibrationsrammarbeiten wird deswegen nicht betrachtet. Falls Vibrationsrammen zum Einsatz kommen, ist eine separate Erschütterungsprognose vorzunehmen.

#### Grundlagen

Die Grundlage für die Prognose bilden dokumentierte Ergebnisse von Erschütterungsmessungen bei vergleichbaren Bauvorhaben und deren statistische Auswertung. Die Daten wurden im Rahmen eines FuE Vorhabens in Abhängigkeit relevanter Parameter statistisch zusammengefasst und für die Prognose von Boden-Bauwerks- und Bauteilschwingungen aufbereitet [U3.2]. Dabei wurde die Abhängigkeit der Erschütterungsgröße von der eingesetzten Energie sowie vom Abstand zur Erschütterungsquelle herausgearbeitet.

Für die Beurteilung der Erschütterungen wird die zu erwartende Schwinggeschwindigkeit  $v_i$  (Richtungskomponenten  $i = x, y, z$ ) betrachtet. Beurteilt werden die Größtwerte der Ganzkörperschwingung an Bauwerken, gemessen am Fundament ( $v_F$ , Größtwert der drei Richtungskomponenten  $x, y, z$ ) und bei Gebäuden auch an der Außenwand im obersten Vollgeschoss ( $v_{OG}$ , Größtwert der horizontalen Komponenten  $x, y$ ) sowie auf Decken ( $v_D$ , Größtwert der vertikalen Komponente  $z$ ) [U4.3].

Für die Beurteilung der Belästigung von Menschen in Gebäuden wird die bewertete Schwingstärke  $KB_{Fmax}$  herangezogen [U4.2]. Messtechnisch wird diese Größe durch gleitende Effektivwertbildung aus dem frequenzbewerteten Zeitsignal der Schwinggeschwindigkeit  $v(t)$  gewonnen. Für Prognose-

zwecke kann  $KB_{Fmax}$  unter Zuhilfenahme der prognostizierten Schwinggeschwindigkeit  $v_D$  bestimmt werden:

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

$KB_{Fmax}$	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)
$v_D$	Größtwert der Schwinggeschwindigkeit auf dem Fußboden am Ort der größten Schwingungen
$f$	dazugehörige Frequenz in Hz
$f_0$	Grenzfrequenz des Hochpasses ( $f_0 = 5,6$ Hz)

Als Prognosewerte werden im Folgenden obere Grenzen mit einer statistischen Sicherheit von  $P = 95 \%$  angegeben.

### Schlagrammung

Für die Prognose der Erschütterungen wird die notwendige Größe und Leistungsfähigkeit der einzusetzenden Rammtechnik grob abgeschätzt. Um einen ausreichenden Rammfortschritt zu erzielen, wird eine Rammenergie von  $E = 35$  kNm (kinetische Energie je Rammschlag) für das Einbringen der Ramelemente mit einer Hydraulikramme angesetzt.

Die Größe der zu erwartenden Schwinggeschwindigkeit  $v_F$  in Abhängigkeit der Entfernung  $R$  zur Rammstelle lässt sich mit folgender empirischer Beziehung näherungsweise ermitteln [U3.2]:

$$v_F = K_F \left( \frac{E}{E_0} \right)^{0,5} \left( \frac{R}{R_0} \right)^{-1} e^{-\alpha_F(R-R_0)} \quad (2)$$

$v_F$	Schwinggeschwindigkeit am Fundament von Bauten in der Entfernung $R$
$K_F, \alpha_F$	empirische Parameter
$E$	kinetische Schlagenergie
$E_0$	Bezugsenergie ( $E_0 = 1$ kNm)
$R$	Entfernung von der Erschütterungsquelle
$R_0$	Bezugsentfernung ( $R_0 = 10$ m)

Mit den Parametern  $K_F = 2,5$  mm/s und  $\alpha_F = 0,0072$  m<sup>-1</sup> wird die obere Grenze des Vertrauensbereichs der Schwinggeschwindigkeit an Bauwerksmesspunkten bei schwerer Rammbarkeit beschrieben. Bei massiven Bauwerken verringert sich der Wert von  $K_F$  um 50 %.

Die Frequenz der maßgebenden Bauwerksschwingungen liegt bei Schlagrammung zwischen 5 Hz und 40 Hz. Im obersten Vollgeschoss von Gebäuden betragen die horizontalen Bauwerksschwingun-

gen erfahrungsgemäß  $v_{OG} \leq 2 \cdot v_F$ . Die Größe der zu erwartenden Schwingungen auf Decken liegt ebenfalls im Bereich  $v_D \leq 2 \cdot v_F$ .

In Tabelle 3 sind die möglichen Größtwerte der Bauwerks- und Bauteilschwinggeschwindigkeiten für die jeweils nächstliegenden Schutzgüter unter den genannten Bedingungen angegeben.

Tabelle 3: Prognose der möglichen Größtwerte der Bauwerks- und Bauteilschwinggeschwindigkeiten für die nächstliegenden Schutzgüter bei Schrägpfahlrammung

Bauwerksart	Titel	Abstand R in m <sup>1)</sup>	Schwinggeschwindigkeit in mm/s		
			$v_F^{2)}$	$v_{OG}^{2)}$	$v_D^{2)}$
Massivbauten	M1	0 (5)	80 (15)	-	-
	M2	38	1,6	-	-
	M3	90	0,47	-	-
	M4	143	0,20	-	-
Gewerblich genutzte Gebäude, Industriebauten und ähnlich strukturierte Bauten	G1	60	1,7	3,5	3,5
	G2	95	0,85	1,7	1,7
	G3	95	0,85	1,7	1,7
	G4	109 (103)	0,67 (0,74)	1,3 (1,5)	1,3 (1,5)
	G5	114 (109)	0,62 (0,67)	1,2 (1,3)	1,2 (1,3)
	G6	119	0,57	1,1	1,1
	G7	124 (133)	0,52 (0,46)	1,1 (0,92)	1,1 (0,92)
	G8	138 (147)	0,43 (0,38)	0,86 (0,76)	0,86 (0,76)
	G9	141	0,41	0,82	0,82
Rohrleitungen	R1	40	5,7 <sup>3)</sup>	-	-
	R2	80	2,1 <sup>3)</sup>	-	-

<sup>1)</sup> – Werte in Klammern entsprechen der minimalen Entfernung bei Schrägpfahlrammung

<sup>2)</sup> – Werte in Klammern entsprechen der maximalen Schwinggeschwindigkeit bei Schrägpfahlrammung

<sup>3)</sup> – maximal zu erwartende Schwinggeschwindigkeit auf der Geländeoberkante

## Bodenverdichten

Die Abschätzung der Erschütterungen durch Bodenverdichtung basiert auf dem Einsatz leistungsstarker Geräte. Um die Spannweite der zu erwartenden Erschütterungen aufzuzeigen, werden zwei Bauverfahren untersucht. Die Erschütterungen werden für Arbeiten mit schweren Rüttelplatten sowie mit Rüttelwalzen dargestellt. Bei beiden Verfahren sind die Gerätemasse und die Vibrationsfrequenz für die Schwingungsabstrahlung entscheidend. Ebenso ist die Richtung der Kraftübertragung auf den Baugrund maßgebend.

Bei translatorischer Vibration von Walzen und Plattenrüttlern erfolgt die Verdichtung des Bodens hauptsächlich durch Druckkräfte. Bei Walzen mit Rotationsschwingungen (sogenannten Oszillationswalzen) resultiert die Verdichtung aus der Scherung des Bodens. Die Schwingungsabstrahlung bei Rotationsanregung ist im Vergleich zur translatorischen Anregung wesentlich geringer. Die größte Schwingungsabstrahlung ergibt sich meist beim An- und Auslaufen der Geräte. Hierbei wird der Resonanzbereich des Systems Gerät-Boden durchfahren. Die Resonanzfrequenz liegt je nach Gerätemasse

im Bereich  $15 \text{ Hz} \leq f \leq 60 \text{ Hz}$ , wobei mit zunehmender Gerätemasse eine Abnahme der Resonanzfrequenz zu verzeichnen ist. Bei geringen Frequenzen ( $f < 30 \text{ Hz}$ ) erhöht sich die Gefahr von Resonanzschwingungen an Bauteilen naheliegender Gebäude.

In Abbildung 1 sind die oberen Grenzen gemessener Bauwerkerschütterungen am Fundament bei Verdichtungsarbeiten mit schweren Rüttelplatten mit Gerätemassen von bis zu 500 kg und Arbeitsfrequenzen  $f > 30 \text{ Hz}$  dargestellt. In der gleichen Abbildung sind zudem die oberen Grenzen gemessener Bauwerkerschütterungen bei Verdichtungsarbeiten mit Rüttelwalzen mit Gerätemassen von bis zu 12 t gezeigt. Hieraus ergeben sich die in den Tabellen 4 und 5 angegebenen möglichen Größtwerte der Bauwerks- und Bauteilschwinggeschwindigkeiten für die jeweils nächstliegenden Schutzgüter.

Bei der Ermittlung der möglichen Größtwerte der Bauwerks- und Bauteilschwinggeschwindigkeiten ist das frequenzabhängige Übertragungsverhalten der auftretenden Schwingungen zu beachten [U3.2]. Bei der Übertragung der Schwingungen vom Fundament auf Decken sowie auf das Obergeschoss von Gebäuden ist die Größe und Frequenz der Schwinggeschwindigkeit am Fundament entsprechend berücksichtigt worden. Für ein Gebäude in einer Entfernung von 109 m zur Erschütterungsquelle (z. B. Schutzgut W5, Tabelle 1) ergibt sich für die Bodenverdichtung mit Rüttelplatten eine Übertragung vom Fundament auf Decken mit  $v_D \leq 13 \cdot v_F$ . Bei der Verdichtung mit Rüttelwalzen liegen die entsprechenden Übertragungsfaktoren im Bereich  $v_D \leq 7,8 \cdot v_F$ . Die Übertragung vom Fundament auf das oberste Vollgeschoss ist in beiden Fällen durch  $v_{OG} \leq 4,7 \cdot v_F$  bestimmt. In großen Entfernungen  $R > 80 \text{ m}$  ist das veränderte Übertragungsverhalten aufgrund der allgemein sehr kleinen Schwinggeschwindigkeiten allerdings von untergeordneter Bedeutung.

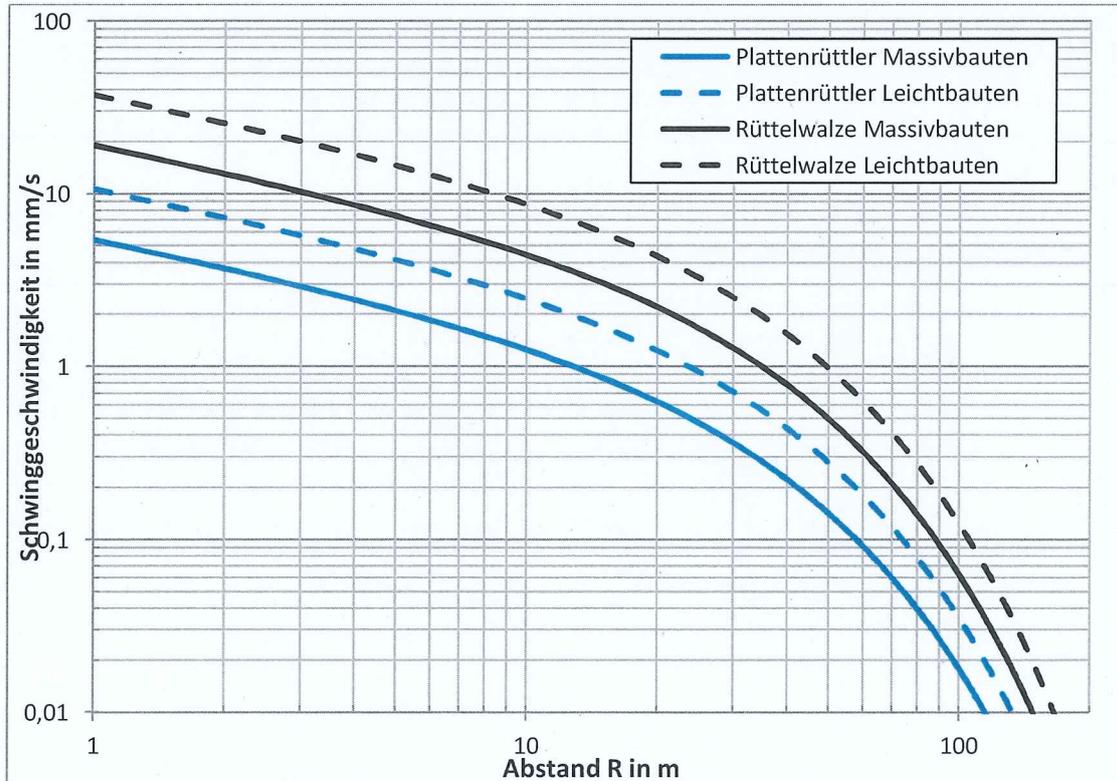


Abbildung 1: Obere Grenzen der Größtwerte der Schwinggeschwindigkeit an Fundamentmesspunkten bei Verdichtungsarbeiten mit schweren Rüttelplatten sowie mit Rüttelwalzen

Tabelle 4: Prognose der möglichen Größtwerte der Bauwerks- und Bauteilschwinggeschwindigkeiten für die nächstliegenden Schutzgüter bei Verdichtungsarbeiten mit schweren Rüttelplatten

Bauwerksart	Titel	Abstand R in m	Schwinggeschwindigkeit in mm/s		
			$v_F$	$v_{OG}$	$v_D$
Massivbauten	M1	0	5,4	-	-
	M2	38	0,24	-	-
	M3	90	< 0,1	-	-
	M4	143	< 0,1	-	-
Gewerblich genutzte Gebäude, Industriebauten und ähnlich strukturierte Bauten	G1	60	0,18	0,63	1,0
	G2	95	< 0,1	0,20	0,45
	G3	95	< 0,1	0,20	0,45
	G4	103	< 0,1	0,15	0,37
	G5	109	< 0,1	0,12	0,32
	G6	119	< 0,1	< 0,1	0,25
	G7	124	< 0,1	< 0,1	0,22
	G8	138	< 0,1	< 0,1	0,13
Rohrleitungen	R1	40	0,89 <sup>1)</sup>	-	-
	R2	80	0,16 <sup>1)</sup>	-	-

<sup>1)</sup> – maximal zu erwartende Schwinggeschwindigkeit auf der Geländeoberkante

Tabelle 5: Prognose der möglichen Größtwerte der Bauwerks- und Bauteilschwinggeschwindigkeiten für die nächstliegenden Schutzgüter bei Verdichtungsarbeiten mit Rüttelwalzen

Bauwerksart	Titel	Abstand R in m	Schwinggeschwindigkeit in mm/s		
			$v_F$	$v_{OG}$	$v_D$
Massivbauten	M1	0	19	-	-
	M2	38	0,86	-	-
	M3	90	< 0,1	-	-
	M4	143	< 0,1	-	-
Gewerblich genutzte Gebäude, Industriebauten und ähnlich strukturierte Bauten	G1	60	0,63	1,2	2,1
	G2	95	0,15	0,58	0,93
	G3	95	0,15	0,58	0,93
	G4	103	0,11	0,49	0,76
	G5	109	< 0,1	0,41	0,67
	G6	119	< 0,1	0,28	0,54
	G7	124	< 0,1	0,23	0,48
	G8	138	< 0,1	0,13	0,35
Rohrleitungen	R1	40	4,5 <sup>1)</sup>	-	-
	R2	80	0,80 <sup>1)</sup>	-	-

<sup>1)</sup> – maximal zu erwartende Schwinggeschwindigkeit auf der Geländeoberkante

## 5 Bewertung der Erschütterungen

### Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden

Die DIN 4150-2 [U4.2] enthält Festlegungen zum Schutz von Menschen vor erheblichen Belästigungen durch Schwingungen in Gebäuden. Beurteilungsgröße ist zunächst die bewertete Schwingstärke  $KB_{Fmax}$ . Für Baumaßnahmen am Tage gelten die Anhaltswerte der Tabelle 2 der Norm (hier dargestellt in Tabelle 6). Unter der zu betrachtenden Dauer  $D$  ist die Anzahl von Tagen zu verstehen, an denen tatsächliche Erschütterungseinwirkungen auftreten. In Gewerbegebieten entspricht die Dauer  $D$  der Anzahl von Tagen, an denen Erschütterungseinwirkungen mit  $KB_{Fmax} > 0,3$  vorliegen.

Tabelle 6: Anhaltswerte zur Beurteilung der Wirkung von Erschütterungen auf Menschen in Gebäuden

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> – Anhaltswerte für 2 bis 5 Einwirkungstage sind linear zu interpolieren

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

Die Festlegungen der Norm gelten als eingehalten, wenn  $KB_{Fmax} \leq A_u$  ist. Sie werden nicht eingehalten für  $KB_{Fmax} > A_o$ . Bei  $A_u < KB_{Fmax} \leq A_o$  muss im Beschwerdefall der Wert  $KB_{Ftr}$  durch entsprechende Messungen ermittelt werden. Die Forderungen der Norm gelten in diesem Fall als erfüllt, wenn  $KB_{Ftr} \leq A_r$ . Die Einhaltung von  $KB_{Ftr} \leq A_r$  kann durch eine Verringerung der täglichen Einwirkungszeit erreicht werden.

Die Beurteilung der Erschütterungseinwirkungen durch Baumaßnahmen erfolgt gebietsunabhängig in drei Stufen. Bei Unterschreitung der Anhaltswerte der Stufe I ist mit keinen erheblichen Belästigungen von Menschen zu rechnen. Sollten die Anhaltswerte der Stufe I überschritten werden ist zu prüfen, ob die Anhaltswerte der Stufe II eingehalten werden. Zusätzlich sind nachfolgende Maßnahmen zu ergreifen, um erhebliche Belästigungen zu vermeiden:

- 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 im Beschwerdefall auch:

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

Bei zunehmender Überschreitung der Anhaltswerte der Stufe II werden mit wachsender Wahrscheinlichkeit erhebliche Belästigungen auftreten. Es ist deshalb zu prüfen, ob der Einsatz weniger erschütterungsintensiver Verfahren möglich ist. Falls dies nicht der Fall sein sollte, ist die Zumutbarkeit zeitlich begrenzter Erschütterungseinwirkungen auch im Bereich erheblicher Belästigungen bis zu einer Zumutbarkeitsschwelle (Stufe III) abzuwägen.

### Einwirkungen auf bauliche Anlagen

Die DIN 4150-3 [U4.3] beinhaltet Anhaltswerte für die Schwinggeschwindigkeit an Bauwerksmesspunkten, bei deren Einhaltung eine Verminderung des Gebrauchswertes von Bauwerken erfahrungsgemäß nicht zu erwarten ist. Die Anhaltswerte sind hier in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Anhaltswerte  $v_{i,max}$  zur Beurteilung der Wirkung von Erschütterungen auf Gebäude

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 Abminderung notwendig sein

Hinsichtlich der Einwirkungen unterscheidet die Norm zwischen kurzzeitigen Erschütterungen und Dauererschütterungen. Kurzzeitige Erschütterungen sind Erschütterungen, deren Häufigkeit und zeitlicher Abstand für das Auftreten von Ermüdungs- und Resonanzerscheinungen unerheblich ist. Dauererschütterungen sind alle Erschütterungen, auf die die Definition der kurzzeitigen Erschütterungen nicht zutrifft. Die Erschütterungen durch Schlagrammung werden den kurzzeitigen Erschütterungen

zugeordnet. Die Erschütterungen durch Vibrationsverdichtung sind als Dauererschütterungen zu bewerten.

Für Ingenieurbauwerke in massiver Bauweise (z. B. Stahlbetonteile für Widerlager, Blockfundamente) gilt nach der DIN 4150-3 ein Anhaltswert von 80 mm/s für kurzzeitige Erschütterungen, sofern keine Gefahren aus bodenmechanischen Vorgängen entstehen können. Da für Dauererschütterungen keine Anhaltswerte angegeben werden, wird empfohlen einen Anhaltswert von  $v_{i,max} = 10 \text{ mm/s}$  für stationäre Schwingungen am Fundament der betroffenen massiven Bauten vorzusehen. Für die Bestandsuferwand (Schutzgut M1) wird ein Anhaltswert von  $v_{i,max} = 25 \text{ mm/s}$  als ausreichend erachtet. Es wird davon ausgegangen, dass Ermüdungs- und Resonanzerscheinungen unter Einhaltung der empfohlenen Anhaltswerte keine Rolle spielen.

Für erdverlegte Rohrleitungen sind in Tabelle 3 der DIN 4150-3 Anhaltswerte für die Beurteilung von kurzzeitigen Erschütterungseinwirkungen gegeben. Für Dauererschütterungen dürfen 50 % der angegebenen Anhaltswerte angesetzt werden. Die Anhaltswerte für erdverlegte Rohrleitungen sind hier in Tabelle 8 zusammengestellt.

Tabelle 8: Anhaltswerte  $v_{i,max}$  zur Beurteilung der Wirkung von kurzzeitigen Erschütterungen auf erdverlegte Rohrleitungen

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

Für oberirdisch verlegte Rohrleitungen und Kabel existieren derzeit keine festgelegten Vorschriften. Liegen seitens der Betreiber keine zulässigen Anhaltswerte vor, wird empfohlen auch für frei verlegte Leitungen die Anhaltswerte der Tabelle 8 heranzuziehen. Ein Sonderfall stellt hierbei die Beurteilung von Gasleitungen dar. Zur Beurteilung der Erschütterungsauswirkung auf Gasleitungen sind weitergehende Betrachtungen erforderlich. Die Auswirkung der Erschütterungen ist unter anderem von folgenden Faktoren abhängig:

- Material, Zustand und Alter der Gasleitung
- Lage der Gasleitung (oberhalb oder unterhalb der GOK)
- Stützkonstruktion bzw. Bettung der Leitung (Art und Lage)

Die Gashochdruckleitung (8 bar, Schutzgut R1) wurde in einer Tiefe von ca. 1,2 – 1,5 m unter der Geländeoberkante in einer Kiesbettung verlegt. Eine zweite, parallel laufende Gasleitung ist außer Betrieb [U1.2][U2.6]. Über den Zustand und das Alter der erdverlegten Leitung sind keine genaueren Angaben erhältlich [U1.2].

## **Einwirkung auf den Boden im Gründungsbereich von Bauten**

Die Auswirkungen von Erschütterungen auf den Boden im Gründungsbereich von Bauten werden mit den oben genannten Anhaltswerten nicht berücksichtigt. Allerdings kann es, je nach Intensität der Erschütterungen, vor allem in locker bis mitteldicht gelagerten nichtbindigen Böden zu Sackungen des Bodens und somit Setzungen von Gründungskörpern kommen. Dies gilt insbesondere für Dauererschütterungen und Böden unterhalb des Grundwasserspiegels.

In Anlage C der DIN 4150-3 werden deshalb Sicherheitsabstände zu nächstliegenden Gründungen auf locker bis mitteldicht gelagerten nichtbindigen Böden empfohlen. Der Abstand zwischen der Erschütterungsquelle und den betroffenen Bauwerken sollte so gewählt werden, dass zwischen Erschütterungsquelle und Fundament ein Winkel von mindestens 30° zur Vertikalen eingehalten wird. Im Grundwasser kann ein größerer Winkel von 45° angebracht sein. Weiterhin wird bemerkt, dass es in größeren Entfernungen zu schwingungsinduzierten Fundamentverschiebungen kommen kann. Selbst wenn keine Gebäudeschäden aus direkter Schwingungsbeanspruchung zu erwarten sind, kann es zu bleibenden Setzungen infolge von Scherverformungen des Bodens kommen. Voraussetzung hierfür sind jedoch ein sehr erschütterungsempfindlicher Boden (locker gelagerter, gleichförmiger Sand oder Schluff) und eine dauernde oder sehr häufig wiederkehrende Erschütterungseinwirkung [U4.5].

Aufgrund von vorliegenden Erfahrungen an der BAW ist es möglich den Gefährdungsbereich durch Bodenerschütterungen unter den genannten Bedingungen abzuschätzen [U3.3]. Alle bisherigen Messungen der BAW bei Rammarbeiten an unterschiedlichen Wasserbaustellen zeigen, dass die Gefahr von Setzungen im oberflächennahen Bereich gering ist solange die Bodenschwinggeschwindigkeit  $v_{i,max} \leq 6 \text{ mm/s}$  ist. Die Angaben beziehen sich auf locker gelagerte nichtbindige Böden. Mit zunehmender Lagerungsdichte und/oder Plastizität des Bodens nimmt die Setzungsgefahr weiter ab.

## **6 Schlussfolgerung und Empfehlungen**

### **Einbringen von Spundwänden und Schrägpfählen mittels Schlagrammung**

Beim schlagenden Einbringen der Rammelemente ist mit keinen direkten Schäden an anliegenden Bauten aufgrund von Erschütterungseinwirkung zu rechnen. Eine Überschreitung der zulässigen Anhaltswerte für bauliche Anlagen kann mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden. Befindet sich die Gasleitung in einem ordnungsgemäßen Zustand können Schäden an der Gasleitung mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden. Da der Zustand und das Alter der Leitung unbekannt sind, sollte die maximal zu erwartende Schwinggeschwindigkeit von  $\sim 6 \text{ mm/s}$  bei kurzzeitigen Erschütterungen dem Betreiber der Gasleitung mitgeteilt werden.

### **Bodenverdichtung mit Vibrationsverfahren im Bereich der Spundwandhinterfüllung**

Bei der Vibrationsverdichtung des Bodens werden voraussichtlich keine direkten Schäden an den anliegenden Bauten auftreten. Eine Überschreitung der zulässigen Anhaltswerte für bauliche Anlagen ist unwahrscheinlich. Zu Schutz der Bestandsuferwand wird jedoch empfohlen, das An- und Auslaufen der Baugeräte in der größtmöglichen Entfernung vorzuschreiben, um die Gefährdung durch Resonan-

erscheinungen gering zu halten Befindet sich die Gasleitung in einem ordnungsgemäßen Zustand können Schäden an der Gasleitung mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden. Da der Zustand und das Alter der Leitung unbekannt sind, sollte die maximal zu erwartende Schwinggeschwindigkeit von  $\sim 4,5$  mm/s bei Dauererschütterungen dem Betreiber der Gasleitung mitgeteilt werden. Falls größer dimensionierte Geräte als die hier angegebenen zum Einsatz kommen, ist eine ergänzende Bewertung vorzunehmen.

### **Setzungen an Bauwerken**

Indirekte Schäden durch erschütterungsinduzierte Bodensetzungen können nach vorliegenden Erfahrungen ausgeschlossen werden. Beim Einsatz von Schlagrammverfahren ist die Setzungsgefahr im Allgemeinen gering, wohingegen eine Gefährdung durch bodenmechanische Umlagerungen bei Verdichtungsarbeiten grundsätzlich möglich ist. Allerdings sind die Baugrundverhältnisse im Bereich der Bestandsuferwand als unkritisch einzustufen. Zudem finden die geplanten Verdichtungsarbeiten oberhalb der Gründungstiefe des bestehenden Anlegers statt. Folglich besteht keine Gefährdung durch dynamische Einwirkungen. In größerer Entfernung ist die Größe der Bodenerschütterungen voraussichtlich sehr gering, sodass auch hier keine Setzungen zu erwarten sind.

### **Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden**

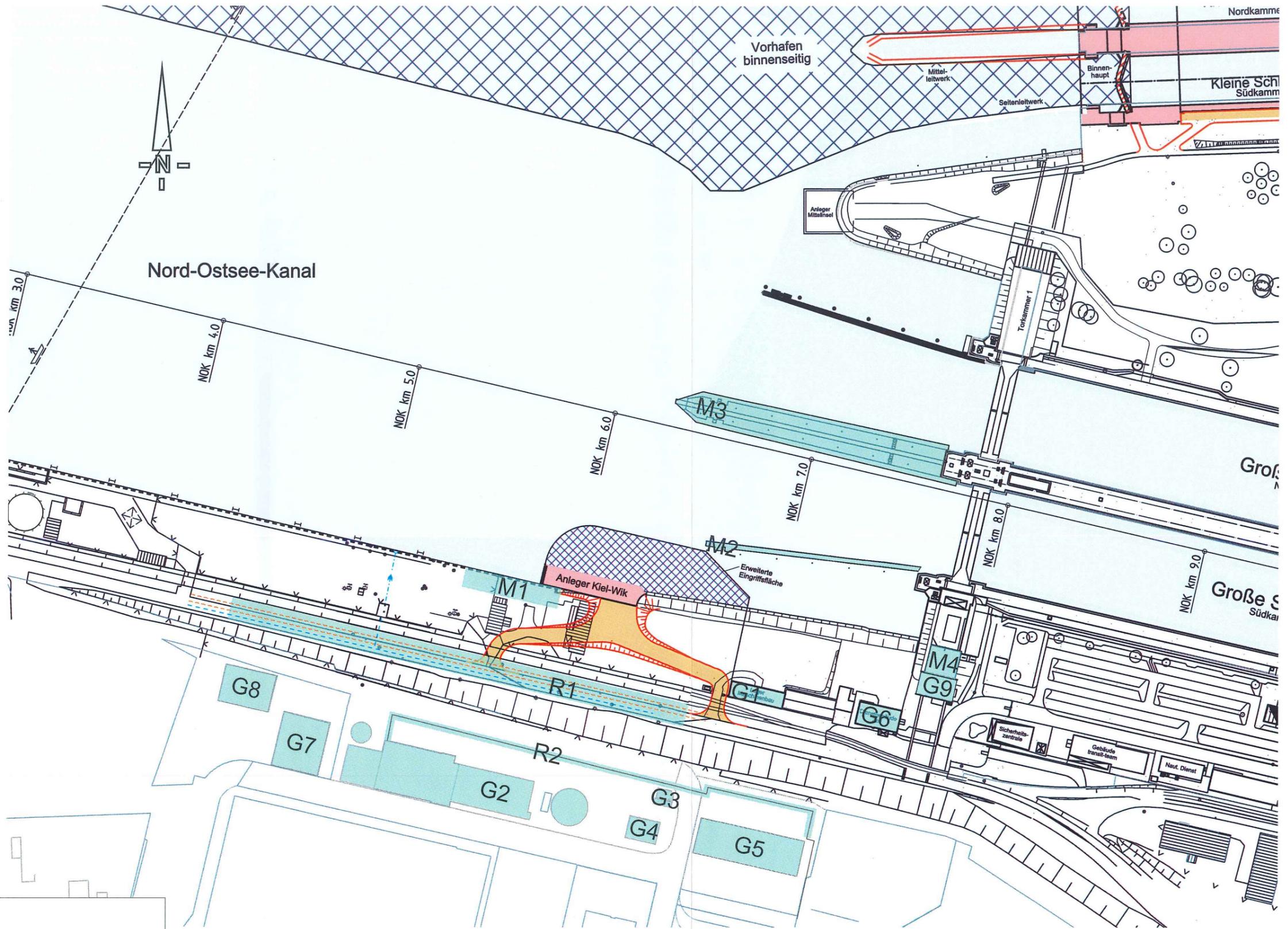
Im Zuge der geplanten Ramm- und Verdichtungsarbeiten können spürbare Erschütterungen im Bereich der naheliegenden Bebauung auftreten. Sollten Erschütterungseinwirkungen an mehr als 6 Tagen vorliegen, ist eine Überschreitung der Anhaltswerte der Stufe I der DIN 4150-2 in Entfernungen von bis zu 125 m möglich. Es wird empfohlen, für diesen Entfernungsbereich vor Beginn der Baumaßnahme die beschriebenen Maßnahmen a) bis e) einzuleiten, um eine erhebliche Belästigung von Menschen zu vermeiden. Im Beschwerdefall ist der Nachweis der tatsächlich auftretenden Erschütterungen durch Messungen sowie deren Beurteilung bezüglich der Wirkung auf Menschen zu veranlassen.

Bei Bedarf und Notwendigkeit ist die BAW zu zusätzlichen Untersuchungen bereit und steht für Rückfragen und weitere Beratung gerne zur Verfügung.

Bundesanstalt für Wasserbau  
Karlsruhe, April 2018

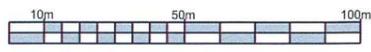
Im Auftrag

  
(Dr.-Ing. Julia Götz)



Legende:

- Schutzgut
- Regenwasserleitung DN 400
- Gasleitung
- Fernwärmeleitung



Geändert	Datum	Bearbeiter	Sachbearbeiter	Datum
		Geprüft	K. Meier	12.02.18
		Gezeichnet	M. Weise	12.02.18
		Datei	B3952.01.06.10086 LP MS.cdr	

Maßstab  
1:2000



<p>Kiel Holtenau Anleger Kiel-Wik Lageplan und Schutzgüter</p>	
<p>Auftrags-Nr. B3952.01.06.10086</p>	<p>Anlagen-Nr. 1</p>