

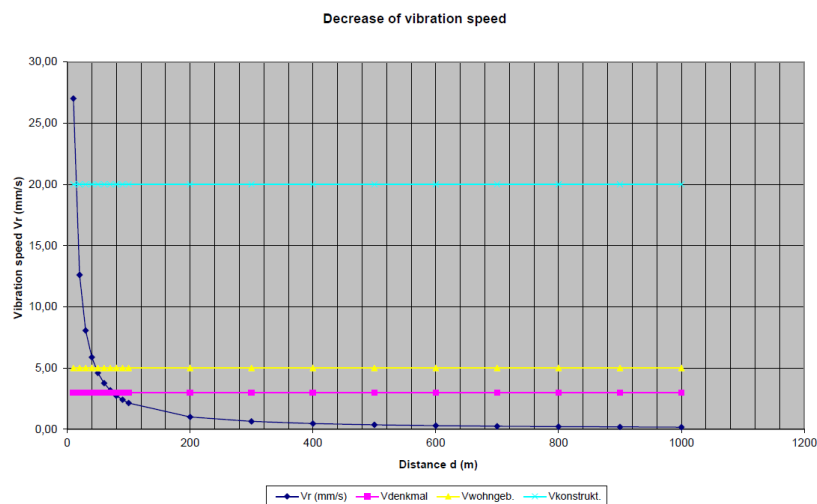
## Anlage 10

Zur Planfeststellung

Erweiterung Lehmannkai 1+

Luisenhof / Siemser Landstraße

23569 Lübeck



## Erschütterungsprognose

(Stand 26.09.2021)

Auftraggeber : Hans Lehmann KG, Seelandstraße 15 in 23569 Lübeck

Auftragsnummer : 160124

26.09.2021

160124Be07revII.docx

**Inhaltverzeichnis**

|         |                                                |    |
|---------|------------------------------------------------|----|
| 1       | Veranlassung.....                              | 1  |
| 2       | Unterlagen .....                               | 1  |
| 3       | Bauwerke.....                                  | 1  |
| 4       | Baugrund .....                                 | 2  |
| 4.1     | Schichtungen.....                              | 2  |
| 4.1.1   | Auffüllung .....                               | 3  |
| 4.1.2   | Organische Weichschichten .....                | 3  |
| 4.1.3   | Geschiebemergelkomplex, Beckensedimente .....  | 3  |
| 4.1.4   | Kiessande.....                                 | 4  |
| 4.1.5   | Sande .....                                    | 4  |
| 4.1.6   | Glimmersande .....                             | 4  |
| 4.2     | Wasserverhältnisse .....                       | 4  |
| 4.3     | Kennwerte .....                                | 5  |
| 5       | Stellungnahme.....                             | 5  |
| 5.1     | Baugeräte.....                                 | 5  |
| 5.2     | Erschütterungen .....                          | 6  |
| 5.2.1   | Vergleichbarkeit der Baugrundverhältnisse..... | 6  |
| 5.2.2   | Kennwerte .....                                | 6  |
| 5.3     | Wellenausbreitung im Baugrund.....             | 6  |
| 5.3.1   | Wellenlänge.....                               | 8  |
| 5.3.2   | Dämpfung.....                                  | 9  |
| 5.3.2.1 | Vibrationsrammungen .....                      | 9  |
| 5.3.2.2 | Schlagrammen.....                              | 11 |
| 5.3.2.3 | Verdichtungsarbeiten .....                     | 11 |
| 5.3.3   | Bodenverflüssigung .....                       | 12 |
| 5.3.4   | Resonanzverhalten des Bodens .....             | 12 |
| 5.3.5   | Beeinflussung des freien Gewässers .....       | 13 |
| 5.3.6   | Erschütterungen durch den Betrieb .....        | 13 |
| 6       | Schluss.....                                   | 13 |

**Detaillierte Unterlagen**

Anlagen werden nicht beigelegt; stehen aber zur Einsichtnahme beim AG zur Verfügung:

/1/ Altlasten (NordGeo, Lübeck):

Statusbericht (49 Seiten) ..... vom 06.02.2017

Übersichtsplan M 1 : 5000 ..... 1

Ehemaliges Triangelgelände, M 1 : 2500 .....

Grundplan Bestand ..... 2a

Werkplan und Altlastverdachtsflächen ..... 2b

Untersuchungsergebnisse Oberboden ..... 2c

Untersuchungsergebnisse Boden ..... 2d

Untersuchungsergebnisse Grundwasser ..... 2e

Ehemaliges Kraftwerksgelände, M 1 : 2500

Grundplan Bestand ..... 3a

Werkplan und Altlastverdachtsflächen ..... 3b

Untersuchungsergebnisse Oberboden ..... 3c

Untersuchungsergebnisse Boden ..... 3d

Untersuchungsergebnisse Grundwasser ..... 3e

Geologische Profilschnitte ..... 4

Anhang A1 bis A3

/2/ Grundwasseruntersuchungen 2017 (NordGeo, Lübeck)

Bericht (13 Seiten) ..... vom 14.07.2017

Übersichtsplan M 1 : 5000 ..... 1

Lageplan der Messtellen, Schnittführung GW-Gleichenplan ..... 2

Geologische Profilschnitte ..... 3

Stammdaten der GW-Messstellen ..... 4

Ergebnis der Stichtagsmessung ..... 5

Grundwassergleichenplan GWL1a ..... 6

Tabellarische Zusammenfassung der Grundwasseranalysen ..... 7

Anhang A1 bis A9 (11 Blatt)

**/3/ Generelle Baugrund- und Gründungsbeurteilung Neubau KW Lübeck-Siems**

(Steinfeld und Partner, Hamburg);

|                                                                      |                        |
|----------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Bericht (68 Blatt)                                                   | vom 29.08.1990         |
| Ergebnisse Bodenmechanischer Versuche (Steinfeld)                    | 03968/20 bis 100       |
| Ergebnisse Wasseranalytik (Städtisches Laboratorium, Kiel, 16 Blatt) | 03968/101.1 bis 108.2) |
| Wasserdruckansatz (2 Blatt)                                          | 03968/109              |
| Lageplan Gesamtbohrplan Stand 01.12.1993                             | 05622/1                |
| Zusammenstellung der Baugrundaufschlüsse 1990 und 1993               | 05622/2                |
| Übersicht Lage der Baugrundschnitte                                  | 05622/3                |
| Bohrprofile Achse x = 0 bis Achse x = 850                            | 05622/4 bis 24         |
| Bohrprofile Einlaufbauwerk                                           | 05622/25               |
| Bohrprofile Auslaufbauwerk                                           | 05622/26               |
| Bohrprofile Ostkaje-Landseite                                        | 05622/27               |
| Bohrprofile Ostkaje-Wasserseite                                      | 05622/28               |
| Bohrprofil Pfahlprobelastung                                         | 05622/29               |
| Bohrprofile Westkaje-Wasserseite                                     | 05622/30               |
| Baugrundschnitte 1-1 (x = 50) bis 9-9 Kohlelagerplatz-Süd (Westkaje) | 05622/31 bis 39        |
| Höhenlinien Oberfläche sehr dicht gelagerter Sande                   | 05622/40               |
| Ergebnisse Bodenmechanischer Versuche                                | 05622/41 bis 217       |
| Übersichtsplan Grundwassermesspegel                                  | 05622/218              |
| Wasseranalysen Stauwasser, oberer und unterer Horizont               | 05622/219 bis 230      |

**Tabellenverzeichnis:**

|                                                          |    |
|----------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 1: Bodenmechanische Kennwerte (char.-Werte)..... | 5  |
| Tabelle 2: Eigenschwingungszahlen.....                   | 12 |

**Abbildungsverzeichnis:**

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1: Abnahme Schwingungsamplitude ..... | 10 |
|-------------------------------------------------|----|

## 1 Veranlassung

Auf dem ehemaligen Gelände des Kraftwerks in Lübeck-Siems sollen 4 neue Logistik-Hallen mit den erforderlichen Verkehrsflächen und einer Gleisanlage errichtet werden. In diesem Bericht wird anhand der vorangegangenen Untersuchungen zu den Baugrundverhältnissen eine Erschütterungsprognose erarbeitet. Die Grundlagen für diese Stellungnahme bilden die Ergebnisse diverser vorangegangener Untersuchungskampagnen.

## 2 Unterlagen

Für die Erarbeitung dieser Stellungnahme sind neben den im obigen Verzeichnis genannten folgende kennzeichnende Unterlagen /.../ zugrunde gelegt worden.

|                                           |                                                      |                |                  |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------|----------------|------------------|
| /2.1/                                     | Lageplan – Planung (Planfeststellungs-Unterlage 4c ) | M 1:2000       | Stand 02.03.2021 |
| /2.2/                                     | Lageplan – Planung Entwässerungskonzept (Unterl. 5a) | M 1:2000       | Stand 30.07.2021 |
| (KMT Planungsgesellschaft mbH, Hamburg)   |                                                      |                |                  |
| /2.3/                                     | Gleislageplan – 1. Bauabschnitt (Unterl. 6a)         | M 1:1000       | Stand 02.07.2021 |
| /2.4/                                     | Längsschnitt Wasserseitiges Gleis (Unterl. 6b)       | M 1:1000 / 100 | Stand 28.05.2020 |
| /2.5/                                     | Regelquerschnitte (Unterl. 6c)                       | M 1:50         | Stand 28.05.2020 |
| (Ingenieurbüro für Eisenbahnbau, Grömitz) |                                                      |                |                  |
| /2.6/                                     | Baugrundbeurteilung und Gründungsempfehlung          |                | Stand 25.09.2021 |

## 3 Bauwerke

Die geplanten Bauwerke sollen auf einem in weiten Teilen ehemals bebauten Gelände nördlich der Untertrave hinter einer bestehenden Kaianlage errichtet werden. Im Mittelbereich des Geländes befand sich das inzwischen (1993) oberirdisch zurückgebaute Kraftwerk Lübeck-Siems, westlich davon der sogenannte Kohlelagerplatz, an den sich weiter westlich das sogenannte Triangel-Gelände (Spanplattenherstellung) anschließt. Östlich des ehemaligen Kraftwerksgeländes schließt der Lehmannkai 1 an, auf dem sich bereits ein Hallenbauwerk befindet.

Das Baufeld wird derzeit als Lagerfläche für Bauschutt und Boden genutzt.

Das Gelände wird auf etwa  $\frac{3}{4}$  der Uferlinie von einer Kaianlage begrenzt, die mit Ausnahme von üblichen Instandhaltungen praktisch nicht verändert werden soll. Im westlichen Viertel der Uferlinie ist das vorhandene Ufer gebösch. Auch hier sind mit Ausnahme von Instandhaltungen keine Maßnahmen geplant. Nach Lotung vom 22.02.1990 liegt die durch Baggerung unterhaltene Trave-Sohle am Rand der Fahrrinne auf NN- 10 m bis NN- 11 m.

Die im Endausbau geplanten 4 Hallenbauwerke sollen in lichten Abständen zwischen 30 m und 74 m zur vorhandenen Kaianlage errichtet werden. Die Längsachsen der jeweils 204 m langen und 42 m breiten Hallen liegen schiefwinklig zur Uferlinie. Die Hallensohlen sollen einheitlich auf NN+ 3,8 m angeordnet werden.

Das Gelände liegt im Bereich der Hallen (Gleistrasse) etwa zwischen NN+ 2,4 m (östlich) und NN+ 5,75 m (westlich, Gleistrasse; im geplanten dortigen Hallenbereich etwa NN+ 3 m).

Nördlich der geplanten Halle und der vorhandenen Halle soll eine Gleisanlage hergestellt werden.

Die Außenanlagen sind weitgehend zur Nutzung als Stapel- und Logistikflächen vorgesehen. Sie werden entsprechend befestigt.

In der Umgebung befinden sich verschiedene Wohngebäude deren Mindestentfernung zum Baufeld rd. 111 m beträgt (Luisenhof 8 – Neubau Lagerhalle 2) und rd. 22,5 m zur neu zu gestaltenden Fahr- und Freifläche. Die übrigen Wohngebäude weisen größere Abstände auf. Von den betrieblich genutzten Bauwerken weist eins des Umspannwerks nördlich der Lagerhalle 3 einen lichten Abstand von rd. 79 m zur Lagerhalle 3 auf. Die übrigen Gebäude sind in größeren Abständen angeordnet.

## **4 Baugrund**

Die Baugrundverhältnisse, die Altlastensituation (Anlagen 1) einschließlich der Wasserbelastungen (Detaillierte Unterlagen 2) wurden im Zuge früherer Untersuchungen und durch das Büro NordGeo, Lübeck zusammenfassend untersucht. Für die hier folgende Auswertung werden in erster Linie die Angaben nach den detaillierten Unterlagen 3 (Büro Steinfeld und Partner, Hamburg s. /2.6/) herangezogen.

### **4.1 Schichtungen**

Folgende Baugrundsichtungen sind erkundet worden:

- 4.1.1 Auffüllung / Altbebauung
- 4.1.2 Organische Weichschichten
- 4.1.3 Geschiebemergelkomplex / Beckensedimente
- 4.1.4 Kiessande
- 4.1.5 Sande

#### 4.1.6 Glimmersande

##### 4.1.1 Auffüllung

Die obere Deckschicht wurde meist in Mächtigkeiten zwischen 2 und 3 m, teilweise auch mit 4 m und mehr aufgeschlossen. Die Abgrenzung zwischen Auffüllung und den folgenden gewachsenen Schichten war anscheinend nicht immer deutlich erkennbar.

Die Auffüllung ist stark unterschiedlich zusammengesetzt. Sie besteht im westlichen Teil überwiegend aus Flugasche, im Bereich zwischen Uferwand und dem ehemaligen Kraftwerksgebäude überwiegend aus Schlacke, im übrigen Bereich aus Sanden mit wechselnden Anteilen bindiger und/oder organischer Böden sowie Bauschutt, Schlacke, Asche, Kohle etc.

##### 4.1.2 Organische Weichschichten

Die Mächtigkeit liegt in der Regel zwischen 7 m und 11 m, die Basis liegt etwa 9 m bis 13 m u. Gel. wobei die Basis zur Trave bis auf 17 m bis 18 m u. Gel. abtauchen kann.

Die Weichschichtunterflächen steigen meist Richtung Norden an, wo sie z.T. auch ganz fehlen.

Es handelt sich häufig um eine kompakte Muddeschicht, teils über geringmächtigem Torf. Teils sind unregelmäßig verteilt auch Sandbänder unterschiedlicher Mächtigkeit eingelagert. Bereichsweise sind mehrere Sand-, Schluff- und Tonschichten vorhanden, die hier mit zu diesem Komplex gezählt werden.

##### 4.1.3 Geschiebemergelkomplex, Beckensedimente

Tieferführend folgt - teils nach einer Übergangsschicht aus Sand (Fein- bis Mittelsand, in weniger als 1 m Dicke) aber auch Steinen und Geröll - ein sogenannter Geschiebemergelkomplex, dessen Mächtigkeit in der Regel zwischen 4 m und 7 m schwankt. Die Basis wurde im Mittelbereich des Baufeldes häufig zwischen 18 m und 20 m u. Gel. erkundet. Nach Iteration liegt die Basis in großen Bereichen zwischen NN- 14 m und NN- 16 m, wobei sie Richtung Westen auf NN- 19 m abfällt. In Richtung Osten fällt die Basis teils noch stärker bis auf Werte tiefer als NN- 26 m.

Der Geschiebemergelkomplex weist entstehungsbedingt Einlagerungen aus Beckensedimenten (Schluff und Ton) Sanden auf, die unregelmäßige Mächtigkeiten und Verteilungen aufweisen. So stehen örtlich auch praktisch reine Beckensedimente oder Sande im Horizont des Komplexes an.

Den Drucksondierungen zufolge sind die hier eingelagerten Sande mit Spitzendrücken unter  $q_c = 5 \text{ MN/m}^2$  nur locker bis sehr locker gelagert. Die unterlagernden Sande weisen dagegen örtlich mit  $q_c = 10 \text{ MN/m}^2$  und mehr mittlere bis dichte Lagerungen auf.

#### **4.1.4 Kiessande**

Unterlagernd unregelmäßig in Mächtigkeit (0 m bis über 9 m) und damit auch unregelmäßig verteilt folgen teils bis in mehr als 30 m u. Gel. kiesige Mittel- bis Grobsande bis hin zu sandigem Kies mit unterschiedlichen Steinanteilen.

Die Lagerungsdichte der Kiessande ist sehr hoch; sie sind mit der Drucksonde häufig nicht durchfahrbare gewesen. Hier kann zur Tiefe von einer extrem dichten Lagerung ausgegangen werden.

#### **4.1.5 Sande**

Im Bereich der geringer-mächtigen Kiessande wurden unterlagernd Mittelsande bzw. Fein- bis Mittelsande erkundet, in denen die überwiegende Anzahl der tiefen Aufschlüsse endet. In den tiefsten Aufschlüssen wurde die Basis dieser Schicht zwischen 32 und 44 m u. Gel. erbohrt. Danach beträgt die maximale Dicke dieser relativ feinkörnigen Schicht rd. 15 m. Örtlich wurde eine dünne (10 cm) Schluffschicht angetroffen.

#### **4.1.6 Glimmersande**

In den tiefsten Bohrungen folgen mit Glimmerspuren durchsetzte Feinsande die dann bis zu den Endteufen von 50 m nicht wieder durchfahren wurden.

### **4.2 Wasserverhältnisse**

Oberhalb der organischen Weichschichten befindet sich erwartungsgemäß ein Stau- und Schichtenwasserhorizont, der zur Trave hin entwässert und mit dem freien Wasser der Trave in Kontakt steht. In der Trave kann von einem Mittelwasser um NN+ 0 bzw. NN+ 0,10 m ausgegangen werden. Am 13.01.1987 wurde ein Hochwasserstand von NN+ 1,81 m gemessen. Dem folgend kann davon ausgegangen werden, dass das Stauwasser auch bei Hochwasser in die Trave abläuft.

Erst bei höheren freien Wasserständen bis hin zur der Bemessungs-Sturmflut-Höhe von NN+ 3,5 m würde der Abfluss hydraulisch stark reduziert bzw. gestoppt.

### 4.3 Kennwerte

Mit den anstehenden Böden sind im Zuge der vorangegangenen Untersuchungen umfangreiche bodenmechanische Versuche durchgeführt worden (Detaillierte Unterlage 3 /2.6/). Danach können für die erdstatischen Berechnungen folgende charakteristische Bodenkennwerte angesetzt werden:

**Tabelle 1: Bodenmechanische Kennwerte (char.-Werte)**

| Bodenart                                        | Wichte<br>$\gamma/\gamma' [\text{kN/m}^3]$ | Steifemodul<br>Es $[\text{MN/m}^2]$   | Scherfestigkeit<br>$\phi' [^\circ]$ $c' [\text{kN/m}^2]$ |   |
|-------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------|---|
| Auffüllungen, vorhanden, überwiegend rollig     | 18/10                                      | $\geq 15$                             | 30                                                       | 0 |
| Auffüllungen, vorhanden, überwiegend bindig     | 17/7                                       | $\geq 5$                              | 27,5                                                     | 0 |
| Mudde, aktive Seite                             | 14,5/4,5                                   | 0,5 <sup>I</sup><br>2,0 <sup>II</sup> | 20                                                       | 5 |
| Mudde, passive Seite                            | 13,5/3,5                                   | 0,5 <sup>I</sup><br>2,0 <sup>II</sup> | 20                                                       | 5 |
| Beckenschluffe, -tone;<br>Schluffe, Tone        | 19/9                                       | $\geq 20$                             | 30                                                       | 5 |
| Geschiebemergel                                 | 22/12                                      | $\geq 40$                             | 32,5                                                     | 5 |
| Untere Sande, Kiese sehr dicht gelagert         | 19/11                                      | $\geq 150$                            | 37,5                                                     | 0 |
| Sand und Sandpolstermaterial (min. mitteldicht) | 19/11                                      | $\geq 40$                             | 35                                                       | 0 |

## 5 Stellungnahme

Für die geplante Anlage sind die anstehenden Auffüllungen und die darunter anstehenden organischen Weichschichten kennzeichnend, die wegen unregelmäßigem Setzungsverhalten eine Flachgründung von Bauwerkskonstruktionen eher ausschließen. Generell wird empfohlen, Konstruktionen auf Pfählen tief zu gründen. Stapel- Fahr- und Parkflächen sowie der Gleiskörper können auch mit Blick auf die bisherige Nutzung dagegen in Verbindung mit zumindest teilweisen Bodenaustauschmaßnahmen flach gegründet werden.

### 5.1 Baugeräte

Bei dem danach zu erwartendem Aushub von Fundament-, Leitungsgräben, Schächten und Fahrbahnunterbauten sowie der Errichtung der Hallen und Herstellung der Betriebsflächen werden übliche Baugeräte eingesetzt.

Dies sind Transport-Fahrzeuge, Bagger, Planierraupen, Radlader, Flächenverdichter, Walzen, Großbohrgeräte, Rammgeräte, Vibrationsrammen (Rüttler), Mobilkräne und Baukräne.

## 5.2 Erschütterungen

Die Auswirkungen bzw. Vibrationen bis Erschütterungen des Geländes sind im Wesentlichen als Punktquellen zu betrachten. Eine Linienquelle wie bei einem schnell vorbeifahrenden Zug kann hier ausgeschlossen werden.

Die höchste Ausbreitungswirkung kann beim bauzeitlichen Einsatz von Rammgeräten (Hydrohammer, Dieselhäure) und Vibrationsrammen angenommen werden. -Im späteren Betrieb der Anlage sind Fahr- und Hebezeuge sowie langsam fahrende Züge (Rangierbetrieb) vorgesehen, die weitaus geringere Energieeinträge verursachen als die Baugeräte.-

Die zulässigen Schwingungen ( $v$ ) betragen nach DIN 4150-3:2019-12 für die verschiedenen Bauwerks-Kategorien:

|                            |                       |
|----------------------------|-----------------------|
| Konstruktionen             | $v = 20 \text{ mm/s}$ |
| Wohngebäude                | $v = 5 \text{ mm/s}$  |
| Denkmalgeschützte Bauwerke | $v = 3 \text{ mm/s}$  |

Dem entsprechend wird nachfolgend zuerst untersucht, inwieweit beim Einsatz von Rammgeräten Erschütterungseinflüsse auf die Umgebung stattfinden. Dazu werden die nachfolgenden Kriterien untersucht.

### 5.2.1 Vergleichbarkeit der Baugrundverhältnisse

Die Baugrundverhältnisse im Bereich der Baustelle und im Bereich der Wohngebäude werden ungünstig betrachtet als vergleichbar angenommen. Tatsächlich ist aber davon auszugehen, dass Richtung Norden der Geschiebeteil zugenimmt, während organische Weichschichten dorthin auslaufen.

### 5.2.2 Kennwerte

Für die Beurteilung der Ausbreitung von Erschütterungen sind vom Boden u.a. die Dichte, die Porosität, die Querdehnzahl, die Dämpfungskapazität und der sogenannte Dynamische Schubmodul kennzeichnend. Zur Einschätzung dieser Kennwerte werden die Ergebnisse aus /2.6/ herangezogen. Diese sind die Grundlage der nachfolgend verwendeten Dynamischen Kennwerte.

## 5.3 Wellenausbreitung im Baugrund

Ein durch dynamische Kräfte beanspruchter Körper im Baugrund führt zu Schwingungen im umgebenden Baugrund. Diese breiten sich von der Schwingungsquelle in Form von Wellen aus.

Wenn sich der Baugrund entsprechend einem elastischen Spannungs-Verzerrungs-Gesetz verformt, pflanzen sich die Schwingungen als elastische Wellen fort. Bei elastischen Wellen wird nur Energie transportiert. Im vorliegenden Fall stehen heterogen zusammengesetzte Auffüllungen,

Mudde, Beckensedimente und zur Tiefe Geschiebemergel sowie Sande an, die bei den anzunehmenden Frequenzen und Amplituden erfahrungsgemäß ein elastisches Baugrundverhalten mit geringen Schubverzerrungen zeigen.

Vorliegend ist von einem praktisch unendlich ausgedehnten Bodenkörper, der nur von der Oberfläche begrenzt wird, also von einem sogenannten Halbraum auszugehen. In einem solchen Halbraum pflanzen sich die Schwingungen entlang der Oberfläche als Oberflächenwellen fort. In einem homogenen Halbraum werden diese auch Rayleighwellen genannt. Die Oberflächenwelle hat folgende Eigenschaften:

Die Ausbreitung der Oberflächenwellen erfolgt parallel zur Oberfläche.

Die Welle besteht parallel aus einer Kombination von Vertikal- und Horizontalschwingungen in Richtung der Wellenausbreitung.

Die Amplitude der Vertikal- bzw. der Horizontalschwingung nimmt mit der Tiefe rasch ab.

Die effektive Eindringtiefe der Welle in den Halbraum beträgt rd. eine Wellenlänge.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit hängt von der Querdehnzahl ab und entspricht näherungsweise 90% der Scherwellengeschwindigkeit.

Grundwasser beeinflusst die Ausbreitung der Welle nur in geringem Maße.

Ab einer Entfernung von rd. einer Wellenlänge  $\lambda_r$  zur Quelle breiten sich die Schwingungen größtenteils in Form der sog. Oberflächenwellen aus. Dies gilt insbesondere für die der vorherrschenden Frequenz entsprechenden Wellenlänge.

Die Amplitude einer Schwingung im sogenannten Halbraum nimmt an der freien Oberfläche mit der Entfernung  $r$  von der Wellenquelle ab. Dabei handelt es sich um die sog. Geometrische Dämpfung oder Abstrahlungsdämpfung. Darüber hinaus ist im Fernfeld auch die Dämpfungswirkung des anstehenden Materials infolge von Energiedissipation (Energieumwandlung) zu berücksichtigen. – Im Nahfeld, also im Bereich kleiner der Wellenlänge  $\lambda_r$  ist die Dämpfungswirkung des Materials bzw. Bodens nur von untergeordneter Bedeutung.- Allgemein gilt, dass die Materialdämpfungskapazität rolliger Böden geringer ist, als die bindiger Böden. Vorliegend kann hinreichend genau mit dem Lehrschen Dämpfungsmaß  $D = \psi/(4\pi) \approx 0,01$  gerechnet werden.

### 5.3.1 Wellenlänge

Die Wellenlänge  $\lambda_r$  berechnet sich aus der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle  $c$  und der Frequenz  $f$  nach der Beziehung  $\lambda_r = c/f$ . Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen wird für nicht wassergesättigte Böden mit Werten von  $200 \text{ m/s} \leq c \leq 800 \text{ m/s}$  und für gesättigte Böden (Lehm) mit  $1300 \text{ m/s} \leq c \leq 1800 \text{ m/s}$  angegeben (STUDER et.al.). Die analytisch kennzeichnende Scherwellengeschwindigkeit  $c$  (oder  $c_s$ ) ist abhängig vom Schubmodul  $G_{\text{dyn}}$  und der Dichte  $\rho$  nach der Beziehung  $c = \sqrt{(G_{\text{dyn}}/\rho)}$ . Die Geschwindigkeit der Oberflächenwelle  $c_R$  beträgt nach allgemeinen Erfahrungen  $\approx 0,9 \cdot c_s$ . Der Schubmodul  $G_{\text{dyn}}$  ist nach empirischen Beziehungen (Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugruddynamik“) zu ermitteln, so dass anhand der relativ leicht zugänglichen o.g. Daten - der Dichte  $\rho$ , der Porenzahl  $e$ , der vorherrschenden allseitig wirkenden mittleren Spannung  $\sigma$  hier entsprechend der Bodenauflast ( $\gamma \cdot h$ ) im kennzeichnenden Bereich – eine realistische Einschätzung der Wellengeschwindigkeiten und damit der Wellenlänge vorgenommen werden kann. Vorliegend kann, ausgehend von den kennzeichnenden Versuchsergebnissen, als realistische Wellengeschwindigkeit  $c_r \approx 250 \text{ m/s}$  (mitteldichter Sand) bis  $1300 \text{ m/s}$  (wassergesättigter Boden zur Tiefe) angenommen werden.

Damit errechnet sich für die vorherrschend genutzte Frequenz beim Einrütteln  $f = 40 \text{ Hz}$  zu:

$$\lambda_r = 250 / 40 = 6,25 \text{ m} \quad (\text{Sand, Auffüllung})$$

bzw. zu

$$\lambda_r = 1300 / 40 = 32,5 \text{ m} \quad (\text{wassergesättigter Boden}).$$

Der Fernbereich, in dem sich die Schwingungen in Form von Oberflächen- bzw. Rayleigh- Wellen ausbreiten, beginnt demnach bereits in einem relativ kleinen bis mittleren Abstand von der jeweiligen Erschütterungsquelle.

Das nächste Bauwerk im Umspannwerk befindet sich mit  $r = 79 \text{ m}$  also im Fernfeld zu den kennzeichnenden Erschütterungsquellen während der Bauzeit der Lagerhalle.

Dem entsprechend kann bei der Untersuchung der Erschütterungsausbreitung auch die Materialdämpfung berücksichtigt werden.

Für die Herstellung / Bearbeitung der Freiflächen sind geringere Abstände kennzeichnend, die eine Materialdämpfung noch nicht erwarten lassen. Für diese Bereiche werden auf empirischen Grundlagen beruhende Einschätzungen vorgenommen.

## 5.3.2 Dämpfung

### 5.3.2.1 Vibrationsrammungen

Die Dämpfung der Erschütterungen bzw. Abnahme der Schwingungen infolge von Vibrationen wird für das Fernfeld nach der Beziehung

$$v_{(r)} = v_{(r_0)} \cdot (r/r_0)^{(-n)} \cdot e^{(-\alpha(r-r_0))}$$

errechnet. Darin bedeuten:

$v$  = Amplituden in mm; Messwert  $v_0 = 8$  mm (Annahme nach Literatur );  $v[r]$  s.u.

$r$  = Abstand zur Erschütterungsquelle/Radius

$n$  = Exponent abhängig von der Art der Schwingungen, der Wellenform und dem Wellentyp, gemäß den Empfehlungen...Baugrunddynamik hier 0,5

$e$  = E-Funktion

$\alpha$  = Abklingkoeffizient  $\approx \psi / (2\lambda)$ ,

$\psi$  = Dämpfungskapazität nach den Empfehlungen...Baugrunddynamik hier 0,1

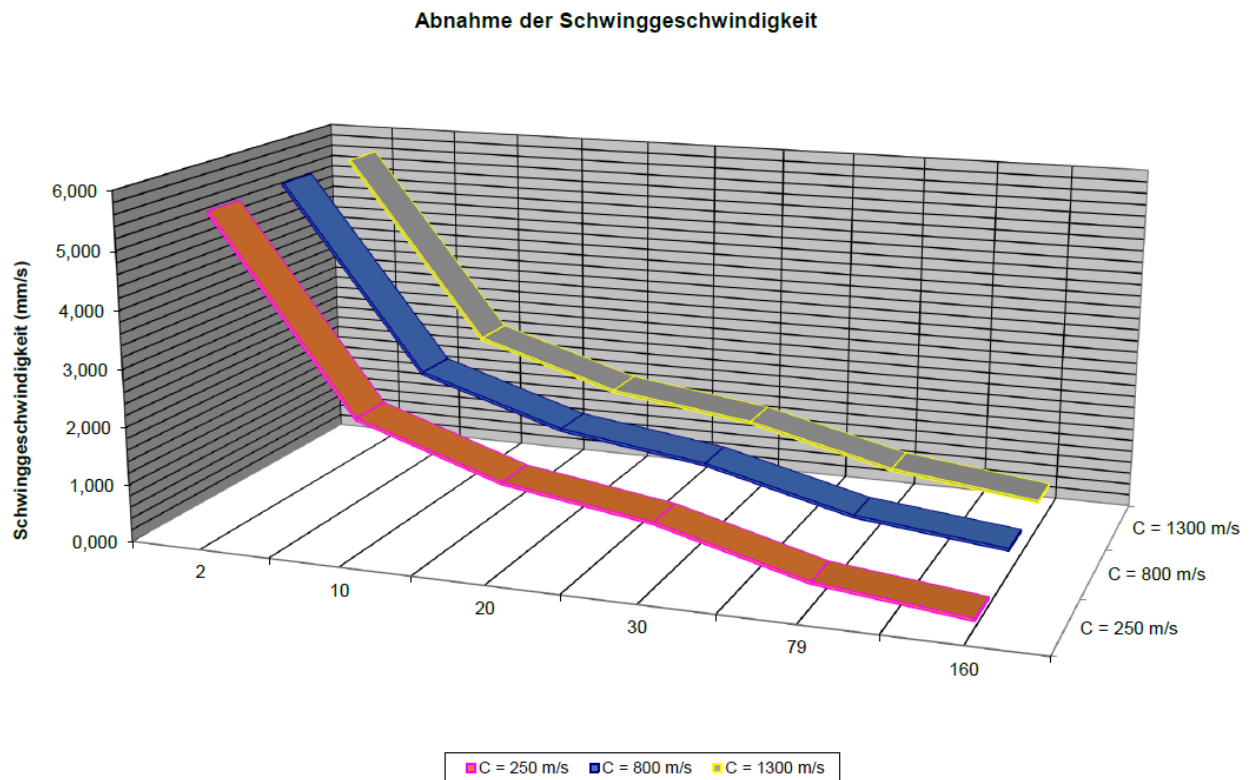
$\lambda$  = Wellenlänge, hier ungünstig 32,5 m

$$\alpha = 0,1/(2 \cdot 32,5) = 0,0015$$

Mit den o.g. Werten errechnet sich die Amplitude im Bereich des nächstgelegenen Bauwerks zu

$$v_{(79)} = 0,8 \text{ mm für } c = 1300 \text{ m/s.}$$

Vergleichsrechnungen mit veränderten Dämpfungskapazitäten und Schwinggeschwindigkeiten führen zu ähnlichen Ergebnissen.



### Abbildung 1: Abnahme Schwingungsamplitude

Daraus ist zu ersehen, dass die Schwingungsamplitude in 79 m Entfernung zum Baufeld in allen Fällen bereits unter 1 mm/s liegt. Die für Denkmäler zulässigen Amplituden betragen 3 mm/s.

Damit ist der Nachweis erbracht, dass bei der Verwendung von Vibrationsrammen praktisch keine Beeinflussung der Nachbarschaft eintritt.

### 5.3.2.2 Schlagrammen

Bei der Verwendung von Schlagrammen gelten im Grunde die gleichen Zusammenhänge wie oben. Die sogenannte Schwinggeschwindigkeit kann dabei auch nach empirischen Zusammenhängen gemäß WIECK ermittelt werden, die zusätzlich die Rammenergie berücksichtigen. Dabei gilt der folgende Zusammenhang:

$$v_{i,max} = 11,07 \cdot ((\sqrt{E}) / r^{1,3})$$

Darin bedeuten:

|       |                      |               |
|-------|----------------------|---------------|
| v     | = Amplitude          | in mm/s       |
| E     | = Schlagenergie      | in kNm/Schlag |
| r     | = Entfernung         | in m          |
| 1,3   | = Empirischer Faktor |               |
| 11,07 | = Empirischer Faktor |               |

Bei Verwendung eines Freifallbärs mit  $E = 180 \text{ kNm/Schlag}$  berechnet sich so für 79 m Entfernung eine maximale Schwingungsamplitude von  $v_{max} = 0,51 \text{ mm/s}$ .

Dieser Wert liegt ebenfalls weit unter dem für denkmalgeschützte Bauwerke zulässigen Wert.

### 5.3.2.3 Verdichtungsarbeiten

Der Einbau der notwendigen Auffüllungen verlangt den Einsatz von Verdichtungsgeräten. Diese werden in geringerem Abstand zum obigen Gebäude im Umspannwerk eingesetzt werden müssen.

Der geringste anzunehmende Abstand beträgt rd.  $r = 5,5 \text{ m}$ . Für den Einsatz von Verdichtungsgeräten gilt ein ähnlicher Zusammenhang wie oben, allerdings mit anderen empirischen Werten; es gilt wie folgt:

$$v_{i,max} = 10,87 \cdot ((\sqrt{G}) / r)$$

Darin bedeuten:

|       |                      |         |
|-------|----------------------|---------|
| v     | = Amplitude          | in mm/s |
| G     | = Verdichtergewicht  | in t    |
| r     | = Entfernung         | in m    |
| 10,87 | = Empirischer Faktor |         |

Für eine Rüttelplatte mit 2 t Gewicht errechnet sich so eine Schwinggeschwindigkeit von  $v_{max} = 2,8 \text{ mm/s}$ . Dem entsprechend wäre dies bei denkmalgeschützten Bauwerken kurz vor dem zulässigen Grenzwert.

Der Grenzwert für Wohngebäude  $v = 5 \text{ mm/s}$  würde bei diesem geringen Abstand erst bei Einsatz 6 t Verdichtern erreicht. Bei Einsatz eine Walzenzuges mit 20 t wird eine Schwinggeschwindigkeit von  $v_{max 5,5} = 8,84 \text{ mm/s}$  erreicht. Sie liegt damit noch weit unter dem für Konstruktionen zulässigen Wert von  $v = 20 \text{ mm/s}$ .

Für das Wohngebäude Luisenhof 8 in 22,5 m Entfernung zur neu zu gestaltenden Freifläche errechnet sich bei einem Verdichtungsgerät mit 20 t eine Schwinggeschwindigkeit von  $v_{\max 22,5} = 0,7 \text{ mm/s}$ . Dies liegt weit unter dem für Wohngebäude, sogar weit unter dem für denkmalgeschützte Gebäude zulässigen Wert von  $v = 3 \text{ mm/s}$ .

Der für Konstruktionen zulässige Wert von  $v = 20 \text{ mm/s}$  wird bei Einsatz von üblichen Verdichtern mit Gewichten von 7 t bis 20 t also bei weitem nicht erreicht.

### 5.3.3 Bodenverflüssigung

Unter Bodenverflüssigung versteht man in Sanden bzw. rolligen Böden die Überführung aus einem festen Zustand in einen flüssigen Zustand infolge einer erhöhten bzw. überhöhten Porenwasser- spannung und einer reduzierten effektiven Spannung des Korngerüsts. Die Ursache können plötz- liche Lasterhöhungen, Vibration, Wellen, Grundwasserströmung und Stoßbelastungen sein; aber es muss Wasser vorhanden sein. Dies ist vorliegend im Bereich der Bauwerke nur in Schichten der Fall, die in Entfernungen zur Oberfläche anstehen. Ein Porenwasserüberdruck zufolge von Zusatz- lasten ist mithin in den rolligen Böden nicht zu produzieren. Die hier infolge der Bautätigkeiten zu erwartenden Stoßbelastungen reichen daher und mit Blick auf die obigen Zusammenhänge nicht für Boden-Verflüssigungen im Baufeld und dessen Umgebung aus.

### 5.3.4 Resonanzverhalten des Bodens

Bei Schwingungen, die den sog. Eigenschwingungszahlen der Böden entsprechen, sind Resonanz- schwingungen zu erwarten, die zu starken Schwingungsausschlägen bzw. Formänderungen im Bo- den führen. Die horizontal und vertikal unterschiedlichen Eigenschwingungszahlen der hier anste- henden Böden sind nachfolgend tabelliert:

**Tabelle 2: Eigenschwingungszahlen**

| Bodenart               | Eigenschwingungszahl in Hz |            |
|------------------------|----------------------------|------------|
|                        | vertikal                   | horizontal |
| Ton, Lehm, Mergel      | 15 bis 28                  | 5 bis 18   |
| Sand, je nach Lagerung | 19 bis 26                  | 5 bis 15   |

Die während der Arbeiten z.B. mit dem Vibrationsbär zu erwartenden Schwingungsfrequenzen be- tragen meist 40 Hz, liegen also außerhalb des Resonanzbereiches. Lediglich in Ausnahmefällen sind Frequenzen von  $5 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$  denkbar. Für die umgebende Bebauung bestehen infolge von Vibrationsrammungen, auch mit Blick auf die mit der Entfernung stark abnehmende Energie keine Gefährdungen hinsichtlich Bodenverflüssigungen.

### 5.3.5 Beeinflussung des freien Gewässers

Die obigen Untersuchungen der nachbarlichen Beeinflussung gelten auch in Richtung des freien Gewässers. Dort ist aufgrund der geplanten Arbeiten bzw. deren Abständen zur Wasserlinie nicht mit größeren Schwinggeschwindigkeiten zu rechnen.

Die dort partiell ggf. notwendigen Arbeiten an der Wasserlinie werden planmäßig ohne Erschütterungen (Bohrarbeiten, Einpressarbeiten) durchgeführt.

Die Beeinflussung durch Erschütterungen im freien Gewässer wird wie schon während der derzeitigen Nutzung des Gewässers im Wesentlichen durch den laufenden Schiffsverkehr (langsam laufende Schiffsdiesel) bestimmt. Diese teilen dem freien Gewässer bzw. dem inkompressiblen Wasser Schwingungen ohne nennenswerte Dämpfung mit.

Infolge der geplanten Arbeiten und der späteren Nutzung werden keine zusätzlichen, über die bisherige Beanspruchung hinausgehenden Effekte auftreten.

### 5.3.6 Erschütterungen durch den Betrieb

Im Betrieb ist mit LKW- und PKW-Verkehr zu rechnen, der in den obigen Entfernungen nicht zu größeren Erschütterungen führt als z.B. durch die Verdichtungsarbeiten bei der Herstellung der Fahr- und Parkflächen. So ist bei LKW-Verkehr rechnerisch mit maximalen Radlasten von 100 kN zu rechnen, die also unter den oben angesetzten Verdichter-Lasten liegen.

Für den PKW-Verkehr kann zum Umspannwerk insgesamt von unter den obigen Grenzwerten liegenden Erschütterungen ausgegangen werden. Zwischen dem nächsten Wohngebäude am Luisenhof und der geplanten PKW-Fahr- und Parkfläche besteht ein minimaler Abstand von 53,5 m. Bei einer maximalen rechnerischen PKW-Radlast von  $Q_k = 10$  kN bzw. 1t sind mit den obigen Ansätzen Schwinggeschwindigkeiten um  $v = 0,2$  mm/s zu erwarten, die weit unter den zulässigen Werten liegen.

Der Schienenverkehr auf dem geplanten Rangiergleis findet in größerem Abstand zur Bebauung statt als auf dem bestehenden Gleis. Bei den im Rangierbetrieb herrschenden geringen Geschwindigkeiten sind weit geringere Erschütterungseinflüsse als aus dem Durchgangsverkehr auf dem bestehenden Gleis.

## 6 Schluss

Die obigen Untersuchungen haben gezeigt, dass für die Beurteilung des Schwingungsverhaltens das nächstgelegene Wohngebäude Luisenhof 8 kennzeichnend ist.

Es wurde auch bei relativ hohen Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Schwingungen im Baugrund ( $c = 1300$  m/s, für wassergesättigte Böden) nachgewiesen, dass die beim Bau der Hallengründung

ggf. einzusetzenden Vibrationsrammen, oder möglicherweise vorgesehene Schlagrammen bei maximalen Schwinggeschwindigkeiten von  $v_{\max,79} = 0,8 \text{ mm}$  die zulässigen Grenzwerte von  $v = 5 \text{ mm/s}$  bei weitem nicht bewirken.

Dies gilt auch beim Einsatz von üblichen Verdichtungsgeräten (Walzenzüge bis 20t), die trotz des geringeren Abstandes zum Wohngebäude von  $r = 22,5 \text{ m}$  zu geringen Schwingungen mit  $v_{\max 22,5} = 0,7 \text{ mm/s}$  führen, was ebenfalls unter dem Grenzwert für Wohngebäude liegt.

In beiden Fällen wird sogar der Grenzwert für denkmalgeschützte Bauwerke von  $3 \text{ mm/s}$  weit unterschritten.

Im Bereich des nächstgelegenen Bauwerkes des Umspannwerkes zur zu bearbeitenden Freifläche werden mit  $v_{\max 5,5} = 8,4 \text{ mm/s}$  die für Konstruktionen zulässigen Schwingungen von  $v = 20 \text{ mm/s}$  nicht erreicht.

Vor diesem Hintergrund wären Beweissicherungen nicht erforderlich. Dennoch sollte an den nächstgelegenen Bauwerken Beweissicherungen durchgeführt werden, die später zur Referenzierung herangezogen werden können.

Die untersuchten Schwingungen beziehen sich auf den ungünstigsten Einsatz von Rammgeräten zur Pfahlherstellung sowie Verdichtungsgeräten. Aus den Untersuchungen zur Herstellung der Frei- und Fahrflächen ergeben sich auch Prognosen für den Betrieb, wonach dabei keine Erschütterungen entstehen, die über die zulässigen Grenzwerte hinausgehen. Der Betrieb der Rangiergleise wird so geringe Erschütterungen erzeugen, die mit Blick auf die geringen Rangier-Geschwindigkeiten unter denen des bisherigen Durchgangsverkehrs auf der bestehenden Hauptstrecke liegen.

Infolge der Verwendung von Bohrgeräten zur Herstellung der Gründungen sind praktisch keine Erschütterungen zu erwarten.

Ralf Kordinand

Beratender Ingenieur  
Prüfsachverständiger  
f. Erd- und Grundbau