

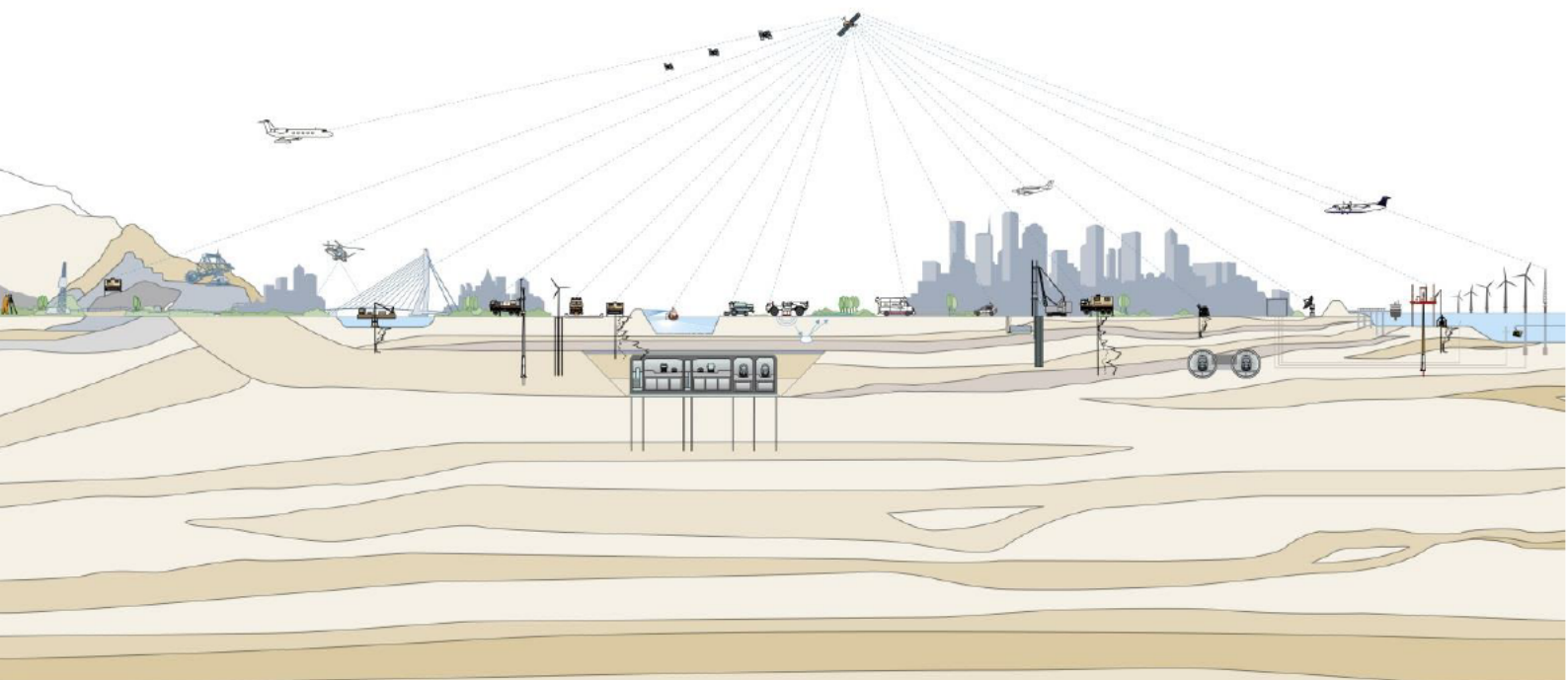
## FUGRO GERMANY LAND GMBH

### Geotechnisches Baugrundgutachten - Brunsbüttel LNG-Terminal

### SCHWINGUNGEN ERZEUGT DURCH RAMMARBEITEN

Fugro Dokument No.: 362 19 006\_3\_DE (04)  
19. März 2021

German LNG Terminal GmbH



**Geotechnisches Baugrundgutachten -  
Brunsbüttel LNG-Terminal**

**SCHWINGUNGEN ERZEUGT DURCH  
RAMMARBEITEN**

Fugro Projekt No.: 362 19 006\_3\_DE (04)

Prepared for: German LNG Terminal GmbH  
Koreastraße 7  
-  
Hamburg  
20 457  
GERMANY



04	Anpassung für barrierefreies Dokument	Sami Labro	Yannick Angelier	Kemal Gürel	19 03 2021
03		██████████	██████████	██████████	25 02 2021
02		██████████	██████████	██████████	19 01 2021
01	Vorläufig	██████████	██████████	██████████	24-10 2019
00	Vorläufig	██████████	██████████	██████████	28-08 2019
<b>Version</b>	<b>Berichts-status</b>	<b>angefertigt</b>	<b>geprüft</b>	<b>genehmigt</b>	<b>Datum</b>

**INHALT**

<b>1.</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
1.1	Hintergrund	1
1.2	Zielsetzung	1
1.3	Zusammenfassung der Boden- und Grundwasserverhältnisse	1
<b>2.</b>	<b>SCHWINGUNGEN ERZEUGT DURCH RAMMARBEITEN</b>	<b>3</b>
2.1	Zulässige Schwinggeschwindigkeiten nach DIN 4150-3	4
2.2	Schlußfolgerung und Empfehlung	4

## **1. EINLEITUNG**

### **1.1 Hintergrund**

Die German LNG Terminal GmbH (German LNG) plant die Errichtung eines Terminals für Flüssiggas (LNG) in Brunsbüttel (Schleswig-Holstein, Deutschland). Der vorgeschlagene Anlagenbereich umfasst zwei LNG-Tankbehälter mit einem Nennvolumen von jeweils 165.000 m<sup>3</sup>. In diesem Zusammenhang wurde die Fugro Germany Land GmbH (Fugro) von der German LNG Terminal GmbH mit einer umfassenden geotechnischen Baugrunderkundung auf dem Gelände des geplanten Brunsbüttel LNG Terminals beauftragt.

Das Projektgebiet des geplanten Brunsbüttel LNG Terminals befindet sich ca. 500 m bis 800 m nördlich des Elbedeiches, in der Nähe der Nordseemündung und des Nord-Ostsee-Kanals. Das geplante Terminal soll aus a) einem Prozessanlagenbereich, b) einem LNG-Tankbereich mit derzeit zwei LNG-Speichertanks und c) einer Rohrtrasse bestehen. Die geplante Rohrtrasse soll die LNG-Speichertanks mit einem geplanten Anlegesteg für Tankschiffe in der Elbe verbinden. Nachfolgend wird die geplante Anlage als „Brunsbüttel LNG Terminal“ bezeichnet.

Das Brunsbüttel LNG Terminal grenzt westlich an die Sonderabfallverbrennungsanlage REMONDIS SAVA und südlich an ein großes Kohlelager der SCHRAMM-Gruppe. Im Osten wird das geplante Terminal durch Weideland begrenzt, was wiederum an der Otto-Hahn-Straße bzw. den Grundstücksgrenzen des stillgelegten Kernkraftwerkes Brunsbüttel (KKB) grenzt. Der Abstand zwischen dem äußeren Rand des geplanten LNG-Tanks BH-03 und den Gebäudegrenzen der Sondermüllverbrennungsanlage wird auf ungefähr 100 m geschätzt. Der Abstand zwischen der Tankwandung des südlichen Speichertanks und der Zaunlinie der KKB wird auf ungefähr 900 m geschätzt.

### **1.2 Zielsetzung**

Die vorliegende Stellungnahme basiert auf den Ergebnissen des geotechnischen Berichts 362\_19\_006 der Fugro und befasst sich mit durch Rammarbeiten erzeugten Vibrationen und deren qualitativen Einordnung auf Grundlage der Grenzwerte in DIN 4150-3.

### **1.3 Zusammenfassung der Boden- und Grundwasserverhältnisse**

Die Geologie innerhalb des Brunsbüttel LNG Terminals kann als homogene und horizontal ausgerichtete Schichtung zusammengefasst werden, die aus drei wesentlichen Bodentypen bzw. Bodenschichten besteht.

Der Boden unterhalb der Auffüllung bis ca. 17,0 m bzw. 18,0 m u. GOK wird als Schicht 1a bezeichnet und besteht aus sehr weichem bis steifem bindigem Boden mit einem hohen Wassergehalt zwischen 35 und 100%. Die Korngrößenverteilung zeigt, dass die Schicht 1a aus ca. 5 bis 40% Ton, 35 bis 65% Schluff, 2 bis 60% Sand und weniger als 1% Kies bestehen kann. Nach DIN 18196 wird die Schicht 1a als TA-OT klassifiziert. Die undränierete Scherfestigkeit dieser Bodenschicht wurde über Korrelationen aus dem CPT Spitzendruck

zwischen 15 bis 50 kPa abgeschätzt. Im gewichteten Durchschnitt beträgt die undrained Scherfestigkeit der Schicht 1a ca. 22,5 kN/m<sup>2</sup>. Die charakteristische Scherwellengeschwindigkeit innerhalb der Schicht 1a wurde zu  $V_s = 86$  m/s abgeschätzt.

Von 17,0 m bzw. 18,0 m bis ungefähr 54,0 m u. GOK werden vorrangig mitteldichte ( $I_D = 63\%$ ) bis sehr dichte ( $I_D = 90\%$ ) grobkörnige Böden angetroffen. Die Korngrößenverteilung zeigt eine eng gestufte Körnungslinie aus Quarzsand mit einer vorrangig gerundeten Kornform. Im geotechnischen Hauptbericht sowie im vorliegenden Memo werden diese grobkörnigen Böden als Schicht 1b, 2 und 3 bezeichnet. Die obere Teilschicht innerhalb dieses grobkörnigen Bodenpaketes mit der größten Auswirkung auf potentielle Rammarbeiten ist als Schicht 1b gekennzeichnet und wird zwischen 17,0 m bzw. 18,0 m bis 24,0 m u. GOK angetroffen. Der gewichtete durchschnittliche CPT-Spitzenwiderstand innerhalb Schicht 1b wurde mit 21 bis 25 MPa berechnet. Der tatsächlich gemessene CPT-Spitzenwiderstand in der mitteldicht bis dicht gelagerten Schicht 1b reicht von ca. 10 bis 40 MPa. Einige CPT-Sondierungen weisen ebenfalls eine Störzone innerhalb der Schicht 1b mit einer Mächtigkeit zwischen 0,5 und 3,5 m auf. Innerhalb dieser Störzone sinkt der Spitzenwiderstand erheblich ab. Die von bindigen Einlagerungen verursachte Störung wurde in 11 von 23 CPT-Sondierungen festgestellt und liegt im Tiefenbereich zwischen 18,3 m bis 23,5 m u. GOK.

Von 54,0 m u. GOK bis ca. 100,0 m u. GOK werden vorwiegend bindige, halbfest bis feste Böden mit einer geschätzten undrained Scherfestigkeit von ca. 200 kN/m<sup>2</sup> bis 700 kN/m<sup>2</sup> angetroffen. Diese bindigen Böden werden als Schicht 4 und Schicht 5 bezeichnet. Schicht 5 kann als überkonsolidierter Geschiebemergel charakterisiert werden. Unterhalb des Geschiebemergels wird zwischen 100,0 m und 200,0 m u. GOK ein überkonsolidierter Ton angenommen. Diese Annahme wurde durch tiefe Bohrungen in der Nähe des LNG-Standorts Brunsbüttel im NIBIS®Mapserver untermauert.

Im Anschluß an die Baugrunderkundung wurden zwei Standrohr-Piezometer (Grundwassermessstellen) installiert. Der Grundwasserspiegel wurde mit 1,60 m u. GOK gemessen. Porenwasserdruckmessungen in Verbindung mit den Drucksondierungen (CPT) bestätigen eine hydrostatische Wasserdruckverteilung bis zur endgültigen Untersuchungstiefe über den gesamten LNG-Standort Brunsbüttel.

Aufgrund der oben genannten Eigenschaften und der Mächtigkeit von Schicht 1a sind Flachgründungen innerhalb des Brunsbüttel LNG Terminals ohne Bodenverbesserungsmaßnahmen nicht realisierbar. Bei lastabtragenden kritischen Bauwerken wird eine Tiefgründung empfohlen. Hierbei kann die Schicht 1a durch gebohrte, gerammte oder geschraubte Pfähle überbrückt werden.

Wenn Ramppfähle eingesetzt werden, sind die durch Rammarbeiten verursachten Vibrationen zu berücksichtigen.

## 2. SCHWINGUNGEN ERZEUGT DURCH RAMMARBEITEN

Eine mögliche Option zur Gründung ausgewählter Anlagen innerhalb des Brunsbüttel LNG Terminals sind gerammte Vollverdrängungspfähle.

Ein häufig verwendeter Verdrängungspfähaltyp sind Ortbetonrammpfähle, auch Simplex-Pfahl genannt. Simplex-Pfähle sind in DIN EN 12699 genormt und können einen Nenndurchmesser zwischen 0,34 m und 0,72 m haben (Buja, 2015). Die Herstellung von Simplex-Pfählen erfolgt durch Eintreiben eines am Fuß geschlossenen Stahlrohrs in den Boden. Das geschlossene Stahlrohr wird nachfolgend mit Beton gefüllt, der Bewehrungskorb eingestellt und anschließend wird das Stahlrohr gezogen.

Die durch den Rammvorgang von Verdrängungspfählen in den Boden eingeleitete Schwingungsenergie breitet sich wellenförmig aus und erzeugt somit Vibrationen, die sich ringförmig von der Erschütterungsquelle wegbewegen und deren Intensität umgekehrt proportional zum Abstand der Erschütterungsquelle abnimmt.

Es wurden verschiedene empirische Formeln aufgestellt, um die Bodenschwingung mit dem Abstand zwischen der Schwingungsquelle und dem Messpunkt in Beziehung zu setzen.

Bei Achmus et. al., "Bauwerkerschütterungen durch Tiefbauarbeiten", Mitteilungen IGBE Hannover, Heft 61, 2005, wird folgende Beziehung zur Abschätzung der maximalen Schwingungskomponente  $v_{i,max}^F$  eines Fundamentes gegeben:

$$v_{i,max}^F = 11,07 \cdot \frac{\sqrt{E_h}}{r^{1,3}} \quad (1)$$

mit:

- $v_{i,max}^F$  = Wert der ungünstigsten Schwingungskomponente eines Fundamentes, (mm/s)
- $E_h$  = Fallenergie, (kNm)
- $r$  = Entfernung zur maximalen Komponente der Fundamentalschwingung, (m)

Die maximale Komponente der Fundamentalschwingung  $v_{i,max}^F$  ist gleich 11,07 mal der Wurzel aus der Rammenergie eines Freifallbaren  $E_h$  geteilt durch den Abstand  $r$  zwischen der Erschütterungsquelle und der maximalen Komponente der Fundament Schwingung.

Die obige Beziehung (1) ist im Wesentlichen eine weiterentwickelte Version der in DIN 4150-1 Abschnitt 5.1.3 dargestellten empirischen Formel für fallende Massen und setzt die maximale Komponente der Fundamentalschwingungen  $v_{i,max}^F$  [mm/s] in Beziehung zur Rammenergie  $E_h$  eines Freifallbaren sowie dem Abstand  $r$  zwischen der Erschütterungsquelle und der maximalen Komponente der Fundamentalschwingung. Der Faktor 11,07 ist ein empirisch ermittelter Parameter in [mm/s], der von den Bodenbedingungen und dem Hammertyp abhängig ist und im Idealfall durch entsprechende Messungen am betrachteten Standort oder unter vergleichbaren Bedingungen ermittelt wurde.

## 2.1 Zulässige Schwinggeschwindigkeiten nach DIN 4150-3

DIN 4150-3 gibt empirische Grenzwerte für zulässige Schwinggeschwindigkeiten  $v_i$  von erschütterungsempfindlichen Bauwerken unter Dauererschütterungen an. Gemäß Tabelle 3 der DIN 4150-3 darf  $v_i$  für erschütterungsempfindliche Bauwerke 2,5 mm/s nicht überschreiten.

Am Beispiel der Installation von Simplex-Pfählen soll die oben beschriebene empirische Formel verwendet werden. Für Simplex-Pfähle mit einem nominalen Pfahldurchmesser von 0,60 m haben sich Rammenergien von ca. 110 kNm bewährt. Wird der Grenzwert für erschütterungsempfindliche Bauwerke  $v_i = 2,5$  mm/s in Verbindung mit der Rammenergie  $E_n = 110$  kNm in die empirische Beziehung (1) eingesetzt und nach  $r$  umgestellt, ergibt sich die Entfernung zur maximalen Komponente der Fundamentalschwingung bzw. der Abstand von der Erschütterungsquelle zum Punkt der Messung zu ca. 20 m. Das heißt nach (1) muss in ca. 20 m Entfernung von der Erschütterungsquelle noch mit einer Schwinggeschwindigkeit von 2,5 mm/s gerechnet werden. Erst über einen Radius von 20 m um die Erschütterungsquelle hinaus kann nach (1) davon ausgegangen werden, dass der Grenzwert von 2,5 mm/s unterschritten wird. Wird die Rammenergie beispielsweise von 110 kNm auf 300 kNm erhöht, wird der Grenzwert von 2,5 mm/s erst in einer Entfernung von ca. 30 m von der Erschütterungsquelle unterschritten.

Der Abstand zwischen dem Außenumfang des Tanks BH-03 und der Sonderabfallverbrennungsanlage (REMONDIS SAVA GmbH) im Osten des Brunsbüttel LNG Terminals wird auf ca. 100,0 m geschätzt. Der Abstand zwischen dem Außenumfang des Tanks BH-03 und der Grundstücksgrenze des stillgelegten Kernkraftwerks Brunsbüttel (KKB) wird auf ca. 900 m geschätzt.

## 2.2 Schlußfolgerung und Empfehlung

Nach Beziehung (1) wird der Grenzwert von 2,5 mm/s innerhalb der Grenzen der Sonderabfallverbrennungsanlage (REMONDIS SAVA GmbH) nicht überschritten, solange die Rammarbeiten von z.B. Simplex-Pfählen innerhalb der Grenzen des Brunsbüttel LNG Terminals in einer Entfernung von mindestens 30 m durchgeführt werden.

Im geschichteten Baugrund können durch Überlagerungseffekte zwischen reflektierter und refraktierter Wellen Abweichungen bzw. Resonanzeffekte entstehen, die vom Verlauf der Beziehung (1) abweichen können. Resonanzeffekte werden durch Schichtsysteme verstärkt, in denen z.B. eine weiche, nicht tragfähige Schicht eine tragfähige, dichte Schicht überlagert. Je steifer die Unterlage desto geringer die Dämpfung und desto ausgeprägter werden die Resonanzeffekte. Das Verhältnis der Wellenwiderstände  $\rho v$  zwischen Schicht 1a ( $\rho_{1a}v_{1a}$ ) und Schicht 1b ( $\rho_{1b}v_{1b}$ ) zeigt deutliche Unterschiede in den dynamischen Bodeneigenschaften. Damit verbundene Resonanzeffekte können derzeit nicht ausgeschlossen werden.

Aus diesem Grund wird empfohlen die Schwinggeschwindigkeiten vor Ort im Rahmen einer Beweissicherung direkt zu messen und nach DIN 4150-3 zu bewerten. In diesem Zusammenhang kann auch der empirische Parameter von 11,07 auf die tatsächlichen Bodenverhältnisse und verwendeten Rammenergien angepasst werden.

Um Fragen von vornherein auszuschließen sollte die Schwinggeschwindigkeit direkt an der tragenden Struktur der Sonderabfallverbrennungsanlage (REMONDIS SAVA GmbH) gemessen werden. Dazwischen sollten weitere Sensoren den Anstieg bzw. Verlauf der Schwinggeschwindigkeit in Richtung Erschütterungsquelle aufzeichnen. Das Monitoring-Programm zur Aufzeichnung der Schwinggeschwindigkeiten kann im Rahmen einer Testrammung oder während der gesamten Rammarbeiten erfolgen. Wenn zeitlich beschränkt nur während einer Testrammung gemessen werden soll, dann muss sichergestellt werden, dass die Testrammung auch unter repräsentativen Bedingungen hinsichtlich Rammenergie, Endteufe, Abstand zu kritischen Bauwerken sowie Bodenschichtung durchgeführt wird.

Die Einordnung von Erschütterungen in Bezug auf Menschen in Gebäuden nach DIN 4150-2 kann nur auf Grundlage von elektronischen Aufzeichnungen der Erschütterungsimmissionen über Schwingungsaufnehmer erfolgen. Die über einen definierten Zeitraum gemessenen Erschütterungsimmissionen im Gebäude werden dann in ein frequenzbewertetes Erschütterungssignal umgewandelt und in weiteren Schritten mittels elektronischer Datenverarbeitung für den zu betrachtenden Zeitraum eine maximal bewertete Schwingstärke  $KB_{F_{max}}$  und eine Beurteilungsschwingstärke  $KB_{F_{Tr}}$  abgeleitet. Die bewertete und die Beurteilungs-Schwingstärke kann dann über ein in DIN 4150-2 definiertes Beurteilungsverfahren mit den Anhaltswerten A für die Beurteilung von Erschütterungsimmissionen in Wohnungen bzw. Räumen verglichen werden.