

**Öffentlich bestellte und vereidigte  
Sachverständige und Prüfsachver-  
ständige für Erd- und Grundbau**

Darwinstraße 13 · 10589 Berlin  
Tel. +49-30-78 90 89-0 · Fax -89  
E-Mail [office@gudconsult.de](mailto:office@gudconsult.de)  
[www.gudconsult.de](http://www.gudconsult.de)

Standorte

Berlin | Leipzig | Hamburg  
Köln | Frankfurt/M. | Athen

# Stellungnahme zu möglichen Bodenverflüssigungen entlang des Pfahlschaftees beim Betrieb der WEA Windpark Uplengen

**Gutachten  
Beratung  
Planung  
Bauüberwachung**

---

Auftraggeber: ENOVA Power GmbH  
Steinhausstraße 112  
26831 Bunderhee

---

Bearbeiter: Dr.-Ing. F. Kirsch  
Dr.techn. A. Tributsch

Geschäftsführer und Prokuristen  
Dr.-Ing. Silke Appel  
Dr. rer. nat. Götz Hirschberg  
Dr.-Ing. Fabian Kirsch<sup>1</sup>  
Dr.-Ing. Jens Mittag<sup>1</sup>  
Dipl.-Ing. Univ. Nikolaus Schneider  
Dipl.-Ing. Kerstin Deterding (ppa.)<sup>4</sup>  
Dipl.-Ing. Hilmar Leonhardt (ppa.)  
Dr. techn. Bert Schädlich (ppa.)

Senior-Berater  
Prof. Dr.-Ing. Kurt-M. Borchert<sup>2</sup>  
Dipl.-Ing. Hans L. Hebener  
Prof. Dr.-Ing. Thomas Richter<sup>3</sup>  
em. Univ. Prof. Dr.-Ing. Stavros Savidis

Berlin, den 27.09.2023

Berichtnummer: G186\_23\_STN02\_Rev00

Diese Stellungnahme umfasst inkl. Deckblatt 10 Seiten.

K:\WP\_Uplengen\_G186.23\BERICHTE-GUTACHTEN\STN02\_Verflüssigung infolge  
Betrieb\G186\_23\_STN02\_Rev00\_Verflüssigung\_Ki,AITr.docm

<sup>1</sup> Anerkannter Prüfsachverständiger für den Erd- und Grundbau.  
<sup>2</sup> von der IHK Berlin öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Baugruben, Injektionen und Bauwerksabdichtungen im Untergrund.  
<sup>3</sup> von der IHK Berlin öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Gründungen, Wasserhaltungen, Erschütterungen im Baugrund.  
<sup>4</sup> EBA-Gutachter für Geotechnik bei Baumaßnahmen im Eisenbahnbau.

**Revisionsblatt** für Bericht G186\_23\_STN02\_Rev00

<b>Revision</b>	<b>Datum</b>	<b>Bemerkung</b>	<b>erstellt</b>	<b>geprüft / freigegeben</b>
00	27.09.2023	Übergabe	Ki/AlTr	Ki

**INHALTSVERZEICHNIS**

<b>1</b>	<b>VERANLASSUNG / AUFGABENSTELLUNG</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>UNTERLAGENVERZEICHNIS</b>	<b>6</b>
	2.1 Unterlagen	6
	2.2 Normen und Richtlinien	6
<b>3</b>	<b>STELLUNGNAHME</b>	<b>7</b>

## 1 VERANLASSUNG / AUFGABENSTELLUNG

Für das Genehmigungsverfahren für den Windpark Uplengen-Firreler Weg wurden im Rahmen der Öffentlichkeitsbeteiligung Stellungnahmen erstellt, die den potenziellen Eintrag von Schadstoffen in den tieferen Untergrund entlang der Pfahlgründung thematisieren.

Zwei der drei geplanten Windenergieanlagen (WEAs) stehen in einem Wasserschutzgebiet (Schutzzone IIIB). Durch die Pfahlgründung wird eine Geschiebelehmschicht durchstoßen, die eine Sperrschicht zwischen dem oberen Grundwasserstockwerk und dem unterem Hauptgrundwasserleiter bildet. Für die Gründung der Windenergieanlagen sind Fertigteile-Rammpfähle (42 Stück je WEA, 40 cm x 40 cm, Länge 18 m bis 20 m) vorgesehen.

Mit [U 1] erhielten wir eine Zusammenfassung der Einwendungen im Rahmen des Genehmigungsverfahrens.

Mit Schreiben vom 06.09.2023 wurden wir von der ENOVA Power GmbH auf der Grundlage unseres Angebotes A 524/23 vom 06.09.2023 beauftragt, zu den folgenden Punkten sachverständig Stellung zu beziehen:

1. Besteht ein hydraulischer Kurzschluss beim Einsatz der Fertigteile-Rammpfähle, bzw. ist die Sperrwirkung zwischen beiden Grundwasserstockwerken nicht mehr gewährleistet bzw. besteht die Möglichkeit einer Wasserwegigkeit zwischen unterschiedlichen Baugrundsichten infolge der Pfahlherstellung?
2. Wie verhält sich der Geschiebelehm unter den durch die WEA eingetragenen Bodenschwingungen und ist eine Bodenverflüssigung mit dem Verlust der abdichtenden Wirkung möglich bzw. besteht die Möglichkeit einer Wasserwegigkeit entlang von Pfählen aufgrund dynamischer Anregungen der Windenergieanlagen, die für eine Verflüssigung des Baugrundes im Nahbereich der Pfähle sorgen.
3. In welchem Umfang entstehen aus dem Betrieb der WEA Schwingungen, welche auch in weiter entfernten Gebäuden als Erschütterungen spürbar sind?

Mit [U 2] liegt ein zugehöriger geotechnischer Entwurfsbericht inkl. Baugrundbeschreibung und Gründungsempfehlung vor. Eine Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse ist in [U 3] enthalten.

Der vorliegende Bericht behandelt unsere sachverständige Beantwortung der Fragestellung 2.

## 2 UNTERLAGENVERZEICHNIS

### 2.1 Unterlagen

- [U 1] Datei: 230712\_UPL\_Zusammenfassung Stellungnahmen Bodenschwingungen Wasserschutz.pdf, ENOVA per E-Mail, ohne Datum
- [U 2] Geotechnischer Entwurfsbericht, Errichtung Windpark mit 3 Windenergieanlagen, Firreler Weg, 26670 Uplengen, Geonovo, 21.12.2021
- [U 3] Hydrogeologisches Gutachten, WP Uplengen H&M Ingenieurbüro 23.11.2021
- [U 4] Y. Hu; W. Haupt; B. Müllner: ResCol-Versuche zur Prüfung der dynamischen Langzeitstabilität von TA/TM-Böden unter Eisenbahnverkehr, Bautechnik 81 (2004), Heft 4.
- [U 5] Y. Hu; E. Gartung; B. Müllner: Bewertung der dynamischen Stabilität von Erdbauwerken unter Eisenbahnverkehr, Geotechnik 26 (2003), Heft 1.
- [U 6] Vucetic, M.: Cyclic Threshold Shear Strain in Soils, 1994

### 2.2 Normen und Richtlinien

- [R 1] EC7-Handbuch T1, Handbuch des Eurocodes 7, Bd. 1, 1. Aufl., Ausgabe 2011, Beuth Verlag GmbH
- [R 2] EC7-Handbuch T2, Handbuch des Eurocodes 7, Bd. 2, 1. Aufl., Ausgabe 2011, Beuth Verlag GmbH
- [R 3] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT): Empfehlungen des Arbeitskreises Baugrunddynamik, 2018

### 3 STELLUNGNAHME

Der Baugrund an den Standorten ist vereinfacht von folgender genereller Schichtenabfolge gekennzeichnet:

- Schicht 0: Oberboden / Auffüllung
- Schicht 1: Feinsand / Schluff
- Schicht 2: Geschiebelehm
- Schicht 3: bereichsweise Organik (Torf)
- Schicht 4: Feinsand

Oberflächennahes Grundwasser wurde in den Aufschlüssen zwischen 1,0m und 3,9m unter GOK angetroffen. Die Schichten 1 (Schluff) und 2 stellen dabei aufgrund ihrer geringen Durchlässigkeiten eine grundwasserstauende Schicht dar.

Zur Gründung der Windenergieanlagen werden Stahlbeton-Fertigrammpfähle eingesetzt. Diese tragen die Bauwerkslasten in den unterhalb der stauenden Schichten anstehenden tragfähigen Feinsanden (Schicht 4) ab. Die hier als Grundwasserstauer fungierenden Schichten 2 und 3 (Schluff und Geschiebelehm) werden dabei vollständig durchörtert.

Gem. [U 2] handelt es sich bei den Schluffen und den Geschiebelehmen um Böden weicher (Schluffe) bzw. steif-halbfester Konsistenz (Geschiebelehm) von geringer Plastizität ( $I_P < 4\%$ ). In den Anlagen zu [U 2] wird den Böden eine undrainierte Scherfestigkeit von  $c_u = 60\text{kPa}$  zugewiesen, was im Erfahrungsbereich der hier beschriebenen Böden liegt.

Für die Fragestellung 2 sind insbesondere die hier als Stauer fungierenden Schluffe und der Geschiebelehm von Bedeutung. Diese müssen auch während des Betriebes der Windenergieanlagen einen kraftschlüssigen und dichten Kontakt zum Pfahlschaft aufweisen, um Wasserwegigkeiten entlang des Pfahles zu verhindern. Dabei wird in [U 1] besorgt, dass durch den Betrieb der WEA Schwingungen in den Baugrund eingeleitet werden, die für eine Strukturveränderung oder Verflüssigung der anstehenden Böden und dadurch zu den beschriebenen Wasserwegigkeiten führen.

Zur Beantwortung dieser Frage wird vorliegend auf Mess- und Erfahrungswerte bei vergleichbaren Maßnahmen zurückgegriffen. Anhand von Schwingungsmessungen an Windenergieanlagen mit Nabenhöhen von ca. 130 bis 140 m und Nennleistungen von rund 3 MW wurden im Teil- und Volllastbetrieb maximale Schwinggeschwindigkeiten von 0,2 mm/s bis 0,3 mm/s am Turmfundament in der Nähe des Turmfußes erfasst.

Berücksichtigt man die gesamte, aufgrund der Überschüttung nicht voll zugängliche Fundamentgeometrie und geht vorwiegend von Kippschwingungen des Fundamentes im Betrieb aus, lassen sich die o.a. Messwerte in maximale Schwinggeschwindigkeiten am Fundamentrand von bis zu 0,65 mm/s umrechnen. Einschließlich eines Sicherheitsfaktors von 1,5 wird daher deutlich auf der sicheren Seite liegend von maximal Schwinggeschwindigkeiten bis max. 1,0 mm/s ausgegangen.

Als Maß für die Gefährdungseinschätzung plastischer Bodenverformungen kann z.B. nach [U 4] und [U 5] die dynamische Scherdehnung im Boden  $\gamma$  betrachtet werden. Sofern die sog. lineare zyklische Scherdehnungsschwelle  $\gamma_u$  nicht erreicht wird, treten keine bleibenden Verformungen des Baugrunds auf.

Die Scherdehnungen  $\gamma$  lassen sich aus den effektiven Schwinggeschwindigkeiten im Baugrund  $v_{\text{eff,BG}}$  nach der Beziehung

$$\gamma = \frac{v_{\text{eff,BG}}}{c_s} \quad c_s = \text{Scherwellengeschwindigkeit im Boden}$$

ermitteln.

Die effektive Schwinggeschwindigkeit im Baugrund  $v_{\text{eff,BG}}$  ist im ungünstigsten Fall mindestens um den Faktor  $\sqrt{2}$  kleiner als die maximale Schwinggeschwindigkeit im Baugrund. Zudem fällt die Schwinggeschwindigkeit im Baugrund kleiner als jene an der Pfahlgründung aus und diese wiederum ist kleiner oder gleich der Schwinggeschwindigkeit am Fundament.

Die Scherwellengeschwindigkeit  $c_s$  der hier relevanten Schluffe und Geschiebelehme von weicher bis steif-halbfester Konsistenz lässt sich als untere Grenze mit rund 200 m/s abschätzen. Hieraus folgt im Sinne einer konservativen, d.h. auf der sicheren Seite liegenden, oberen Abschätzung:

$$\gamma \leq \frac{1,0 \cdot 10^{-3} \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] / \sqrt{2}}{200 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]} = 3,5 \cdot 10^{-6}$$



Die untere Scherdehnungsschwelle  $\gamma_{tl}$  liegt bei bindigen Böden mit einer Plastizitätszahl von ca. 4% bei etwa 0,00045% bzw.  $4,5 \cdot 10^{-6}$ , sodass das Risiko bleibender (plastischer) Verformungen auszuschließen ist – vgl. Bild 1.

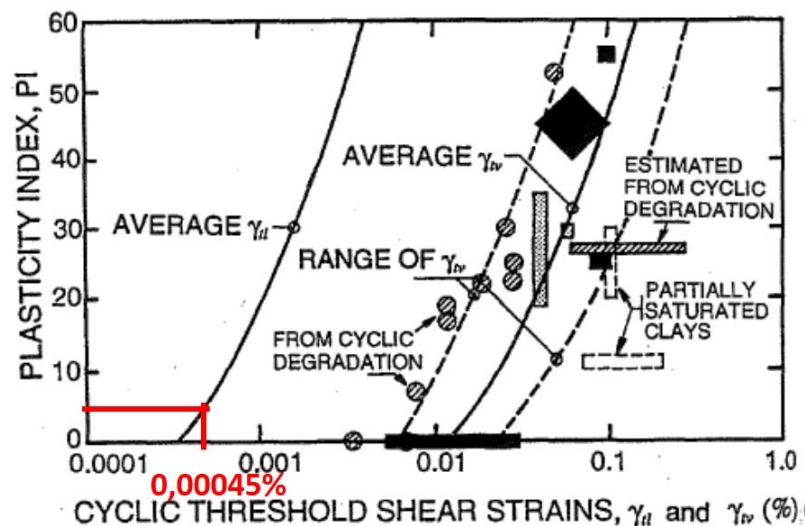


Bild 1: Zyklische Scherdehnungsschwellen nach [U 6]

Neben einer bleibenden zyklischen Verformung kann auch das Eintreten einer Verflüssigung der anstehenden Böden bei den hier zu erwartenden Schwingungseinträgen ausgeschlossen werden.

Bei einer Verflüssigung werden die Bodenpartikel infolge einer zyklischen Scherung so bewegt, dass eine Verdichtung des anstehenden Materials zu erwarten ist. Diese Verdichtung geht einher mit einer Verringerung des Porenraumes. Ist dieser wassergefüllt und kann aufgrund einer geringen Durchlässigkeit des Baugrundes das Porenwasser nicht schnell genug abfließen, bewirkt dieser „Verdichtungswunsch“ einen Anstieg des Porenwasserdruckes. Steigt dieser so stark an, dass die effektiven Spannungen auf dem Korngerüst bis nahe Null reduziert werden, verliert ein vornehmlich reibungsbehafteter Boden (Sand) seine Festigkeit - er „verflüssigt“.

Bindige Böden, wie die hier relevanten Schluffe und Geschiebelehme, weisen als Bestandteile ihrer Festigkeit neben der sog. inneren Reibung auch eine erhebliche Kohäsion auf, die nicht spannungsabhängig ist. Daher neigen diese Böden nicht zur Verflüssigung.

Selbst wenn eine Verflüssigungsneigung bestünde, sind die hier zu erwartenden Scherspannungsniveaus – ausgedrückt über das sog. „cyclic stress ratio – CSR“ so gering, dass eine Verflüssigungsgefahr ausgeschlossen werden kann.

Unter dem für die anstehenden Schluffe und Geschiebelehme plausibel angenommenen Ansatz eines dynamischen Schubmoduls  $G_0 = 50.000 \text{ kPa}$  (siehe z.B. [R 3]) ergeben sich aus den o.a. Scherdehnungen folgende Schubspannungen:

$$\tau_{\text{cyc}} = \gamma_{\text{cyc}} * G_0 = 3,5 * 10^{-6} * 50.000 \text{ kPa} = 0,175 \text{ kPa}$$

Das CSR errechnet sich aus dem Quotienten der zyklischen Schubspannungen und dem effektiven Überlagerungsdruck, hier in min. 2 m Tiefe unterhalb der Auffüllungen angenommen zu  $\sigma'_v \geq 25 \text{ kPa}$  und damit:

$$\text{CSR} = 0,175 \text{ kPa} / 25 \text{ kPa} = 0,007.$$

Eine Bewertung der Verflüssigungsgefahr z.B. im Erdbebenfalle ist erst bei CSR Werten von mehr als ca. 0,05 üblich und sinnvoll möglich, so dass ein solcher Effekt ausgeschlossen werden kann.

Berlin, den 27.09.2023



Dr.-Ing. F. Kirsch



Dr.techn. A. Tributsch