

---

---

## ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

---

---

УДК 624.131

### СТРОИТЕЛЬСТВО ВЕТРОГЕНЕРАТОРА НА ОТВАЛЕ ОТРАБОТАННОГО КАРЬЕРА

© 2015 г. **Ф. Майер\***, **Г. Брайтшпрехер\***, **М. Деннхардт\***, **У. Глезенер\*\***

*\*CDM Consult GmbH, Bouchéstraße 12, Berlin, 12435 FRG.*

*E-mail: friederike.meyer@cdm.com*

*\*\*Enercon GmbH, Dreckamp 5, Aurich, 26605 FRG. E-mail: uwe.glaesener@enercon.de*

Поступила в редакцию 15.02.2014 г.

На автодроме “ЕвроСпидвей Лаузицринг” построен ветрогенератор типа Enercon E-126/BF/131/36/02 мощностью 7.5 МВт, высотой 131 м с ротором диаметром 126 м. Строительная площадка находится на месте внутреннего отвала бывшего карьера в Мойро. Грунты откоса отвала очень неоднородны и подвержены текучести. Для упрочнения основания проводились виброуплотнение и вибротрамбование. Непосредственно после виброуплотнения проведены контрольные измерения – статическое зондирование и сейсмические испытания. Благодаря расчетам, основанным на результатах статического зондирования, удалось значительно оптимизировать координатную сетку вибротрамбования по сравнению с первичными расчетами. Приведена информация о необходимых мерах по подготовке основания в зоне фундамента и установки кранов, а также об основных вопросах управления качеством в сфере подготовки основания и контроля.

**Ключевые слова:** *ветрогенератор, отвал, виброуплотнение, статическое зондирование.*

На автодроме “ЕвроСпидвей Лаузицринг” к востоку от Клеттвица в регионе Нижняя Лужица, примерно в 115 км к югу от Берлина, в настоящее время под девизом “Зеленый Лаузицринг” строятся солнечная станция для зарядки электромобилей и электростанция на биогазе и энергии ветра. Решается задача обеспечения постоянного автономного энергоснабжения автодрома от возобновляемых источников [4, 5].

Электростанция Enercon E-126/BF/131/36/02 высотой 131 м и диаметром ротора 126 м имеет мощность 7.5 МВт. Эксплуатирует станцию компания Energiequelle GmbH (Цоссен). Проектированием, поставкой оборудования и монтажом занимается компания Enercon GmbH (Аурих). Компания CDM Consult GmbH Berlin участвовала в проекте как партнер Enercon GmbH в области геотехники и занималась изысканиями, проектированием и расчетами укрепления основания.

Проект реализуется на рекультивированных площадях внутреннего отвала карьера Мойро высотой около 70 м. Неоднородный, рыхлый материал отвала нуждается в упрочнении для строительства ветроэнергетической станции. На глубине 20–40 м под фундаментом расположена главная зона воздействия нагрузок и вибрации.

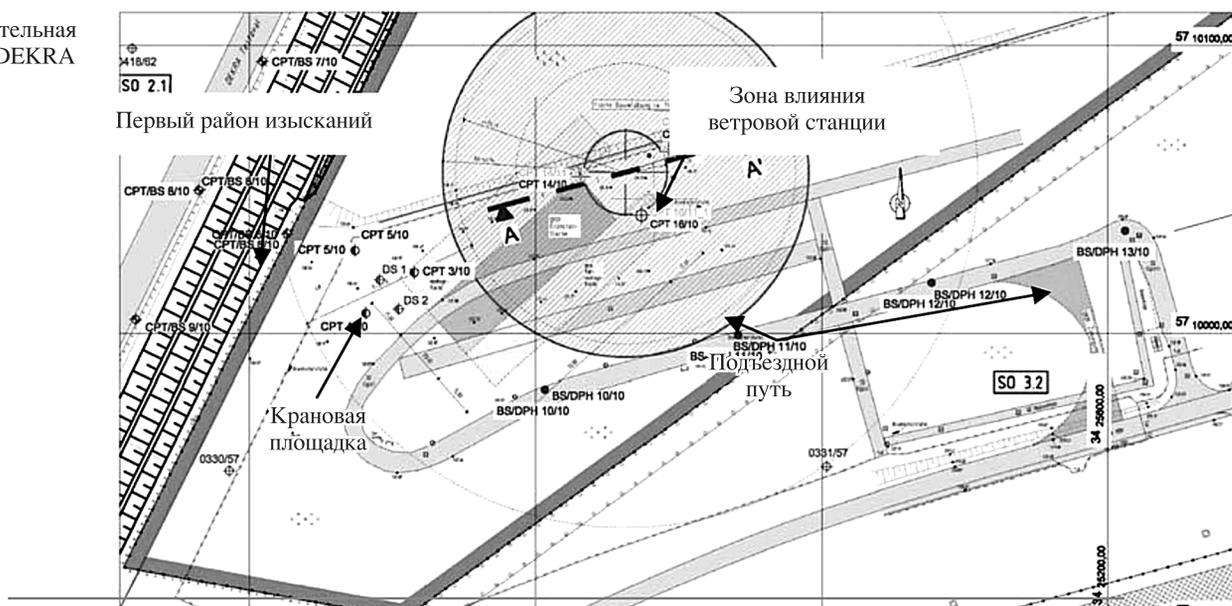
Электростанция возводится в центре палаточного городка. Для закладки фундамента станции потребовалась дифференцированная оценка грунта при статических и динамических нагрузках с целью анализа возникающих деформаций.

Ниже приводятся требования к системе “конструкция-грунт”, в частности, для неоднородных грунтов, а также рекомендации по упрочнению грунта.

Проект реализуется на поле Гёрлиц, где с 1960 по 1999 г. находился буроугольный карьер Мойро. В 60-е и 70-е годы прошлого века вскрышная порода транспортно-отвальным мостом сбрасывалась в выработанное пространство. Суммарная мощность карьерного отвала составляет от 40 до 70 м. Отвалообразование буроугольного карьера было завершено около 35 лет назад, и затем отвальный массив уплотнялся под действием собственного веса. Дальнейшая осадка возможна только при новых нагрузках и изменении уровней подземных вод [1, 2].

Предварительно строить ветроэнергетическую станцию планировалось в районе палаточного городка Лаузицринга в непосредственной близости от откоса испытательной трассы компании DEKRA (рис. 1). До привлечения компании

Испытательная  
трасса DEKRA



**Рис. 1.** Район проектирования ветроэнергетической станции (с крановой площадкой и подъездным путем) с местами изыскательских вскрышных работ.

CDM были проведены инженерно-геологические изыскания, результаты которых, однако, оставили открытыми ряд вопросов относительно физико-механических свойств грунтов, расположенных на глубине до 70 м.

В июне 2010 г. проведены дополнительные исследования грунта в зоне строительства ветроэнергетической станции, включавшие также лабораторные испытания (рис. 2):

- статическое зондирование природного грунта до глубины около 60–70 м ниже верхней кромки откоса, у основания откоса до глубины около 50–60 м ниже верхней кромки и на гребне откоса до глубины 30 м ниже верхней кромки;
- бурение малым диаметром до глубины макс. 15 м ниже верхней кромки;
- динамическое зондирование до глубины 6 м ниже верхней кромки вдоль подъездного пути.

Дополнительно определена плотность отвальных масс верхнего яруса для установления необходимой глубины выемки или толщины конструкции укрепления подъездного пути для большого грузного транспорта.

На основании исследований строительного грунта и ориентировочных расчетов устойчивости от этой площадки пришлось отказаться. Необходимые работы по укреплению грунта и его общая подверженность текучести представляли опасность, в частности, для испытательной зоны

DEKRA. Новая площадка была выбрана примерно в 100 м к северо-востоку от первой, на которой в октябре 2010 г. выполнены пенетрационные испытания до глубины около 75 м. Свойства грунтов на новой площадке в основном соответствуют свойствам грунтов на старой.

Смешанный грунт отвала различного гранулометрического состава и плотности до глубины около 11 м ниже верхней кромки характеризуется высокой рыхлостью и мягкой консистенцией. Примерно на глубине 14 м ниже находится укрепленная рабочая площадка абзетцера. Под ней располагаются неоднородные грунты различной консистенции и плотности залегания, которые до глубины около 63 м в основном находятся под угрозой текучести. Ниже находится еще одна укрепленная бывшая рабочая площадка, залегающая под песчаным либо слабо глинистым материалом с схожей плотностью залегания. Бурый уголь залегают на глубине 74.5 м ниже верхней кромки (абс. отм. 59.5 м). Уровень грунтовых вод (УГВ) в 2009 г. располагался на отм. 106 м. В связи с выводом из эксплуатации горнопромышленных установок в районе прогнозируется, что УГВ в долгосрочной перспективе повысится до отметки примерно 113 м (см. рис. 2).

На основании статических расчетов компания CDM признала строительный грунт крайне неоднородным и неспособным выдержать вертикальные, горизонтальные и скручивающие нагрузки и напряжения, вызываемые ветроэнергетической

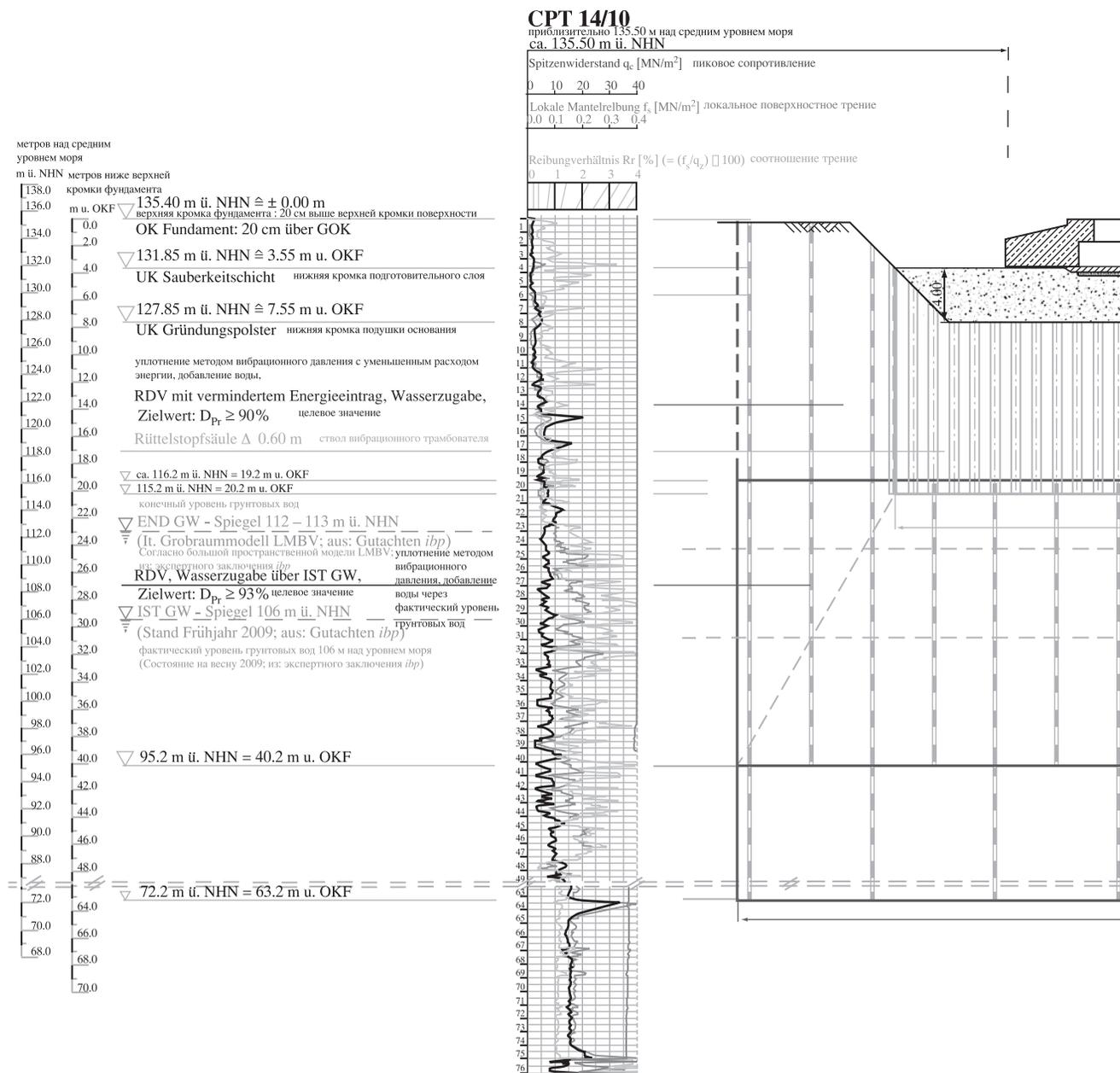


Рис. 2. Профиль (A–A' на рис. 1) фундамента ветроэнергетической станции с колонкой статического зондирования.

станцией. В частности, при динамических нагрузках в подверженных текучести песках могут возникать непредвиденные неравномерные оседания и просадки. Подобные явления отмечались в непосредственной близости от строительной площадки (в долине Шпрее). Для обеспечения соответствия минимальным требованиям компании к круглому фундаменту неглубокого залегания без поддерживающей силы в соответствии с подходами Прибе [3] были проведены работы по укреплению грунта путем виброуплотнения, последующего вибротрамбования и укладки подушки из щебня.

Работы по виброуплотнению проводились перед вибротрамбованием до глубины 63 м под гребнем отвала. В общей сложности уплотнительные работы проводились в 199 точках треугольной сетки в зоне фундамента. До глубины 20 м под верхней кромкой (глубинная зона вибротрамбования) добавлялся промытый песок, на последующих глубинах – мелкий щебень. Примерно на 2/3 площади проекта добавлялось > 1.2 т/м, а в остальной зоне от 0.6 до 0.96 т/м.

В рамках пробного уплотнения выявлены локальные высокие сопротивления (засыпанные

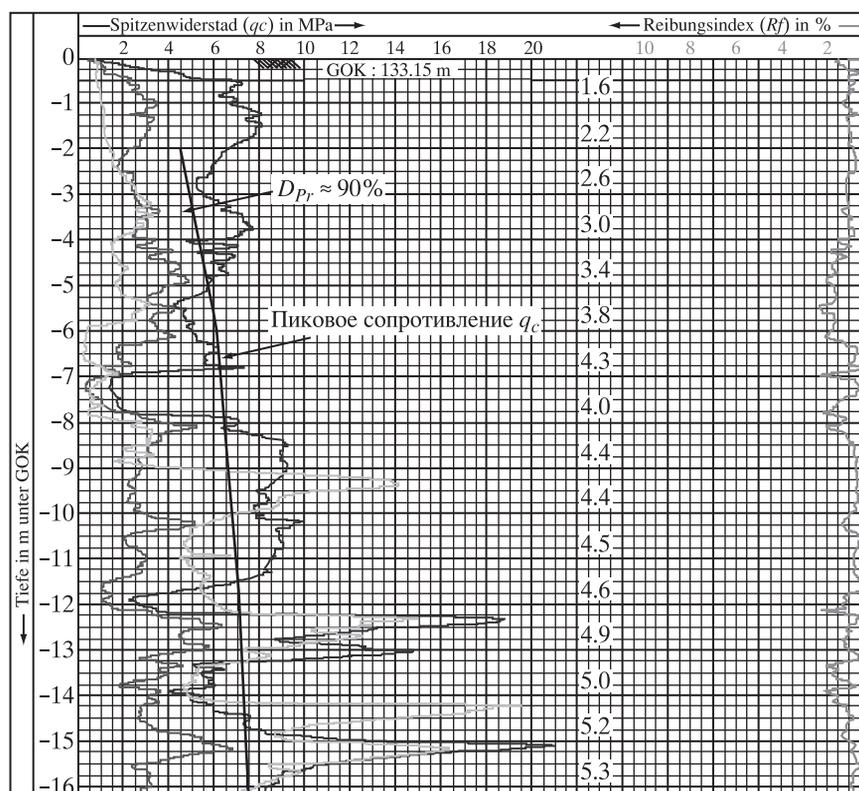


Рис. 3. Диаграмма статического зондирования с кривой  $D_{pr}$  выше 20 м под верхней кромкой.

обломки автомобилей, шпалы и т.п.), начиная с примерно 50 м ниже поверхности отвала. По согласованию с CDM точки, соседствующие с теми, уплотнить которые до заданной глубины не удалось, уплотнялись до большей глубины. Это стало возможно только благодаря сбору подробной информации о рабочих параметрах. Так как грунт на небольших площадях был неоднородным, вышеупомянутые препятствия встречались только в отдельных местах, то количество точек, уплотненных до глубины 63 м ниже поверхности, и расстояния между точками глубокого уплотнения в итоге соответствовали заданным параметрам.

Эффект работ по виброуплотнению проверялся методом статического зондирования. Сравнение результатов показало, что уплотнение оказалось успешным. Необходимые показатели плотности залегания после виброуплотнения были заданы в плане контроля качества, составленном в рамках экспертизы строительного грунта: ниже 20 м под верхней кромкой:  $D_{pr} \geq 93\%$ , выше 20 м под верхней кромкой:  $D_{pr} \approx 90\%$ .

Приведенные показатели  $D_{pr}$  основывались на значениях, полученных опытным путем в рамках многочисленных трехосных испытаний, которые в связи с другим проектом проводились на отвале

“Мойро Зюд” и отражали особенности грунта в том месте (рис. 3). Установленные в DIN 1054 корреляции между относительной плотностью  $D_{pr}$  и средним пиковым сопротивлением  $q_c$  в данном случае неприменимы в связи с антропогенным воздействием на грунт.

Из-за сжатых сроков строительства контрольные измерения проводились сразу по окончании виброуплотнения. Однако для проявления явного эффекта виброуплотнения преимущественно связных грунтов отвалов обычно требуется определенное время для упрочнения грунта. По опыту компании CDM, полученному при работе со схожими грунтами, это занимает не менее 12 недель.

Сравнение плотности залегания грунта до и после виброуплотнения показывает, что относительная плотность  $D_{pr} \approx 90\%$ . На большей глубине выявлено частичное значительное ухудшение показателей пикового сопротивления  $q_c$ , что объясняется также отсутствием временного промежутка между работами по виброуплотнению и зондированием.

В сочетании со статическим зондированием по инициативе компании Enecon были проведены сейсмические исследования (таблица). Результа-

## Сравнение сейсмического измерения и статического зондирования

	Сейсмическое измерение	Статическое зондирование
Принцип	Измерение сейсмических поверхностных полей для определения скорости поперечных и продольных волн. Используются одноосевые геофоны, регистрирующие вертикально или горизонтально возбуждаемые волновые поля в вертикальном или горизонтальном направлении	Требования согласно DIN 4094. Проверяется, в том числе, плотность залегания грунта. Измерительная головка с постоянной скоростью вдавливается в грунт системой рычагов. Измеряются пиковое давление, поверхностное трение и давление воды в порах
Длительность	Занимает больше времени, чем статическое зондирование	Выполняется быстро
Влияние на грунт	Неразрушающий метод	Разрушение пренебрежимо мало
Результаты	Результаты по всей полевой сети	Точечные результаты
Обработка	Для калибровки требуются результаты статического зондирования	Для калибровки требуется вскрытие
Прочее	Неточная интерпретация ослабленных зон	

ты статического зондирования и сейсмического измерения показывают значительные расхождения в том, что касается статических и динамических коэффициентов упругости и поперечного расширения. В частности, отмечается снижение упругих характеристик в сейсмическом профиле из-за наличия различных дефектов.

Установлена необходимость надежного сравнения данных сейсмических исследований и статического зондирования. При этом следует учитывать влияние на физико-механические свойства отвалных грунтов их неоднородности и гидравлических характеристик. По этой причине результаты сейсмических исследований по совету специалиста, проводившего статические испытания, не были учтены при дальнейшей оценке грунта. Таким образом, при составлении оценки эксперт руководствовался исключительно данными контрольного статического зондирования. С учетом упрочнения грунта в результате виброуплотнения выполнены статические расчеты. Виброуплотнение на глубину до 20 м позволило значительно оптимизировать сетку вибротрамбования примерно на 55% по сравнению с первичными расчетами.

Летом 2011 г. было проведено вибротрамбование грунта по треугольной сетке на глубину около 20 м. Вследствие высокой степени уплотнения грунта после виброуплотнения вибротрамбовку пришлось проводить с водой. Затем была уложена армированная георешеткой щебеночная подушка толщиной около 4 м.

Для монтажа ветроэнергетической станции требуется гусеничный кран Terex CC 9800, которому нужны рабочие площадки с несущей способностью 260 кН/м<sup>2</sup> в непосредственной рабо-

чей зоне крана. Для вспомогательных монтажных кранов требуется рабочая площадка несущей способностью 185 кН/м<sup>2</sup>, а также подъездные пути с достаточной несущей способностью. Теоретически осадка грунта на крановой площадке должна быть нулевой.

Имеющийся в районе крановой площадки грунт, как и грунт в непосредственной зоне фундамента, не выдерживал такие значительные нагрузки без предварительного упрочнения. Для подтверждения естественной плотности залегания грунта было проведено дополнительное статическое зондирование. Предложения по размещению подъездных путей и рабочих площадок разработала компания CDM.

Для предотвращения опасных различий осадки отвалный грунт в зоне крановой площадки был извлечен на глубину до 3 м под верхней кромкой и заменен слоями уплотненного материала. Относительная плотность должна была составить  $D_{pr} = 98\%$ . На возвращенный грунт было уложено сочетание геотекстиля и георешетки TriAx TX170-G с промежуточным щебеночным слоем толщиной 25 см, а сверху – еще один слой щебня толщиной 25 см. Вариации толщины щебеночного слоя могут влиять на оседание; тем не менее, полностью исключить оседание нельзя. Дополнительно на армированную георешеткой щебеночную подушку укладывались маты для экскаваторов, распределяющие нагрузку и уменьшающие глубину колеи.

В соответствии с методикой ориентировочного расчета [6], имеющийся щебеночный слой толщиной 20 см обеспечивает достаточную несущую способность пути. Исключить локальные оседа-

ния в зоне подъездного пути нельзя из-за неоднородности грунта; при необходимости их следует устранять.

Монтаж башни станции начался в ноябре 2011 г. До настоящего времени в зоне крановых площадок и подъездных путей не было обнаружено оседаний, которые отклонялись бы от спрогнозированных.

С учетом неоднородности грунта и большой сложности возводимого сооружения не все влияющие факторы и граничные условия можно определять в ходе проектирования. Требуется добросовестный контроль качества строительных работ и квалифицированное геотехническое сопровождение, чтобы:

а) свести к минимуму риск для персонала и техники,

б) верифицировать достижение запланированного улучшения строительного грунта,

в) обеспечить необходимые корректировки процесса и методов строительства.

В рамках виброуплотнения и вибротрамбования требовался сбор, по меньшей мере, следующих цифровых сведений и рабочих параметров, а также их документирование и проверка с целью обеспечения качества:

- обозначение точек виброуплотнения или вибротрамбовки,
- глубина,
- время проведения,
- объем подаваемого материала,
- скорость подачи и вытягивания вибратора, время нахождения в грунте, интервалы,
- потребление тока.

Документация передавалась консультанту по геотехнике для проверки соответствия нормативам каждый рабочий день. Записи о поданном во время виброуплотнения и вибротрамбования объеме материала обычно используются как важное подтверждение расчета выполненных работ. Для целенаправленной коррекции работ по уплотнению в зависимости от условий грунта в соответствии с пунктами (б) и (в) точная запись параметров также имела большое значение.

В рамках строительных проектов аналогичной сложности на таком же неоднородном грунте работы в зоне ожидаемой осадки всегда должны контролироваться следящими измерительными системами.

**Датчик давления воды в порах** (многоуровневый пьезометр). При динамическом уплотнении

насыщенного водой грунта могут возникать зоны повышенного давления воды в порах, что может привести к значительной потере сопротивления сдвигу и разжижению грунта. При необходимости работы следует замедлить или остановить до тех пор, пока давление воды в порах не снизится до приемлемого уровня.

**Контроль уровня.** Отсутствие оседаний не отрицает существование глубоких зон осадки, которые еще не проявились до поверхности, но через некоторое время могут привести к резкому опусканию. Подобные ситуации весьма опасны.

Непрерывное генерирование данных измерения позволяет получить точную информацию о свойствах грунта и провести близкий к реальности анализ и оценку работ по уплотнению. Эти данные могут быть основой для автоматической сигнализации и оповещения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основание ветрогенераторов, строящихся на территории отработанных карьеров, слагал крайне неоднородный, свободно отсыпанный и чувствительный к разжижению отвальный материал. Для нормального функционирования этих объектов потребовалось проведение комплекса мероприятий по упрочнению основания. Кроме того, вывод из эксплуатации расположенных вокруг горнодобывающих предприятий мог приводить к длительному подъему уровня подземных вод. При строительстве ветрогенераторов, в зависимости от их типа, области глубин между 20 и 40 м от поверхности основания – зоны влияния статических и динамических нагрузок. Поэтому для закладки фундамента соответствующих сооружений осуществлена дифференцированная оценка грунта при различных нагрузках для реалистичной оценки возможных деформаций.

Примером решения сложных вопросов, связанных со взаимодействием элементов системы “сооружение/строительный грунт”, является проект “Ветрогенератор ЕвроСпидвей Лаузицринг”. В 2012 г. введен в эксплуатацию ветрогенератор типа Enercon E-126/BF/131/36/02 мощностью 7.5 МВт, высотой 131 м с ротором диаметром 126 м. Ветрогенератор построен на внутреннем отвале угольного карьера в Мойро. Грунты отвала очень неоднородны и подвержены текучести и перед началом строительства, поэтому потребовалось проведение обширных мероприятий по подготовке основания.

Базы данных с геотехническими характеристиками для различных грунтов отвала имеют осо-

бое значение для реалистичного анализа и оценки работ по уплотнению. Документированные данные, кроме того, являются основой для автоматической сигнализации и оповещения. Полученный опыт представляет интерес для последующих проектов, так как ветрогенераторы будут строиться в будущем преимущественно на сложных для освоения территориях и в том числе на отвалах отработанных карьеров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. LMBV (Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau- und Verwaltungsgesellschaft mbH, 1999): Tagebau Meuro 1958 bis 1999.
2. Hydrogeologische Übersichtskarte der DDR 1:200.000 (1967) Hydrogeologische Grundkarte M33 – II, Finsterwalde samt Profilkarte. Hrsg.: Zentr. Geol. Institut, Berlin, im Auftrag des Staatssekretariats für Geologie.
3. *Priebe H.J.* Die Bemessung von Rüttelstopfverdichtungen. Bautechnik, 72. Jahrgang, Heft 3/1995, S. 183–191.
4. Projekt Grüner Lausitzring. <http://www.lausitzring.de/besucherportal/unternehmen/gruener-lausitzring.html>, Zugriff am 18.01.2012.
5. Richtlinie für Windenergieanlagen“, Fassung März 2004; Deutsches Institut für Bautechnik – DIBt-, Berlin.
6. Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Strassenbefestigungen – RPE-Stra 01 (Ausgabe 2001).

## CONSTRUCTION OF WIND-POWER GENERATOR WITH THE CAPACITY 7.5 MW AT THE DUMP OF THE WORKED-OUT OPEN PIT

**F. Meyer\*, G. Breitschprecher\*, M. Dennhardt\*, U. Glesener\*\***

*\*CDM Consult GmbH, Bouchéstraße 12, Berlin, 12435 Germany.*

*E-mail: friederike.meyer@cdm.com, www.cdm.com*

*\*\*Enercon GmbH, Dreekamp 5, 26605 Aurich, Germany.*

*E-mail: uwe.glaesener@enercon.de, www.enercon.de*

At Eurospeedway Lausitzring, situated in Lower Lusatia, a wind turbine of Enercon was built. The turbine will achieve an electrical efficiency of 7.5 MW with a hub height of 131 m and a rotor diameter of 126 m. The working panel lays within the former inner overburden dump of the lignite mine of Meuro. The predominant landfill can be described as a mixed very heterogeneous soil, endangered of liquefaction.

For improving the ground conditions vibro compactions (VC) and vibro displacements (VDD) were carried out. Shortly after completing the VC control measurements by CPT and seismic measurements were carried out to prove the soil compaction. By comprehensive calculations the CPT results enabled a broad improvement of the vibro-displacement-grid compared to first calculations. The following paper comments on the conditioning of soil at the foundation area and crane pad and presents relevant corner points of the quality management concerning the completion and monitoring of the soil improvement. Thereby it will be focused on geotechnical characteristics of heterogeneous landfill soil.

**Keywords:** *wind-power generator, dump, vibrocompaction, static sounding, open-pit.*