

Sonderdruck

Kolkschutz für Offshore- Windenergie- anlagen in der Nordsee

Juli 2011

**Prof. Dr.-Ing. Georg Heerten
Dr.-Ing. Karsten Peters**

Kolkschutz für Offshore-Windenergieanlagen in der Nordsee

Georg Heerten
Karsten Peters

Mit der fortschreitenden Errichtung von Windenergieanlagen im Offshore-Bereich der Nordsee rücken Fragen der langfristigen Standsicherheit dieser Anlagen in den Blickpunkt. Aufwändige Gründungsstrukturen in Wassertiefen von 10 bis 60 m sind ein erheblicher Kostenfaktor gegenüber Anlagen an Land. Fragen der Kolkentwicklung und mögliche Kolkschutzmaßnahmen sind zu untersuchen und zu lösen. Gegenüber traditionellen, aus mineralischen Komponenten geschütteten Kolkschutzvarianten finden Geokunststofflösungen zunehmend Beachtung, da sie einerseits den Einsatz örtlich anstehenden Bodenmaterials erlauben, vergleichsweise einfach und sicher einzubauen sind und andererseits keine Beschädigungen von Kabelzuführungen und Korrosionsschutz bei Stahlbauelementen der Anlagen zu befürchten sind. Der Beitrag berichtet über bisherige Erfahrungen zu Kolken und Kolkschutz bei Offshore-Anlagen in der Nordsee sowie über den Stand der Technik der Bemessung, des Füllens und des Einbaus von Sandcontainern aus Vliesstoffen im Gründungsbereich von Offshore-Windenergieanlagen (OWEAs) und nimmt Bezug auf schon ausgeführte Untersuchungen.

Scour protection for offshore wind energy generators in the North Sea. *The increasing erection of offshore wind energy generators in the North Sea raises questions about the long-term stability of such structures. Extensive foundation structures in water depths of 10 to 60 m are a significant cost factor compared to land installation. Questions about scour development and measures to protect against scour need to be investigated and solved. In contrast to traditional scour protection provided by tipping mineral components, geotechnical plastics are of increasing interest, because they permit the use of undisturbed ground on the site, are relatively simple and safe to install and also no damage to cable entries or corrosion protection of steel structures needs to be worried about. The article reports on experience so far with scour and scour protection for offshore facilities in the North Sea and the state of the technology in the design, filling and installation of sand containers made of geotextiles around the foundations of offshore wind energy facilities and also refers to investigations already performed.*

1 Einleitung

Nach der Errichtung von zahlreichen Gas- und Ölförderanlagen in der Nordsee seit etwa 1965 erfährt die Offshore-Technik einen neuen Höhepunkt durch die Errichtung vieler Windparks mit dem Aufstellen mehrerer Tausend Offshore-Windenergieanlagen (OWEAs) und zahl-

reicher Umspannwerke weit vor den Küsten in Wassertiefen von 10 bis 60 m. OWEAs mit 5 MW Leistung, einer Gesamthöhe vom Meeresboden (30 m Wassertiefe) bis zur Rotorspitze von ca. 190 m und ca. 1.000 t Gewicht haben sich zum aktuellen Standard entwickelt, mit dem Trend zu noch größeren Anlagen. Monopile-, Tripod-, Jacket- oder Schwergewichtsrundungen stehen in Abhängigkeit von Wassertiefe, Bodenverhältnissen und Belastungsgrößen aus Wind, Seegang und Tide alternativ im Wettbewerb, um einen kostengünstigen Bau, Betrieb und Rückbau der Anlagen zu gewährleisten. Die aufwändige Gründung in großen Wassertiefen trägt maßgeblich zu deutlich höheren Anlagenkosten als an Land bei. Es wird erwartet, dass die Gründung bis zu 50 % der Baukosten erreichen kann und damit das Gründungskonzept von großem Einfluss auf die Gesamtkosten eines Windparks werden kann [4].

Jede Gründungsstruktur stört das dynamische Gleichgewicht zwischen äußeren hydrodynamischen Einwirkungen und dem mobilen Meeresboden, der in der Nordsee überwiegend aus mehr oder weniger dicht gelagerten Sanden und Feinsanden besteht. Oberflächennahe Mergelschichten mit höherem Erosionswiderstand sind die Ausnahme. Durch Wechselwirkung zwischen Gründungsstruktur, Gründungskörper, hydrodynamischer Belastung und Meeresboden ist mit Erosions- und Sedimentationsvorgängen im Nahbereich der Bauwerke sowie einer Auflockerung des Meeresbodens zu rechnen. Die Sohlveränderungen im Nahbereich (Kolke) sind bei der Standsicherheit der Gründungsvariante zu berücksichtigen oder sicher durch entsprechende Kolkschutzmaßnahmen zu verhindern. Hier sind vor dem Hintergrund bestehender Unsicherheiten bei der Kolktefenermittlung neue, hoch wirksame Kolkschutzmaßnahmen zu entwickeln, die eine Beeinträchtigung der Standsicherheit einzelner Windturbinen ausschließt.

2 Bisherige Erfahrungen zu Kolken und Kolkschutz in der Nordsee

2.1 Gas- und Ölförderanlagen

Aus den frühen Jahren der Gas- und Ölförderung aus der Nordsee liegen umfangreiche Erfahrungen mit der Gründung von Förderplattformen vor [5]. Im südlichen Teil der Nordsee galt es, bei Wassertiefen von 10 bis 30 m Erdgasfelder zu erschließen. Hier kamen durchweg mit Pfählen

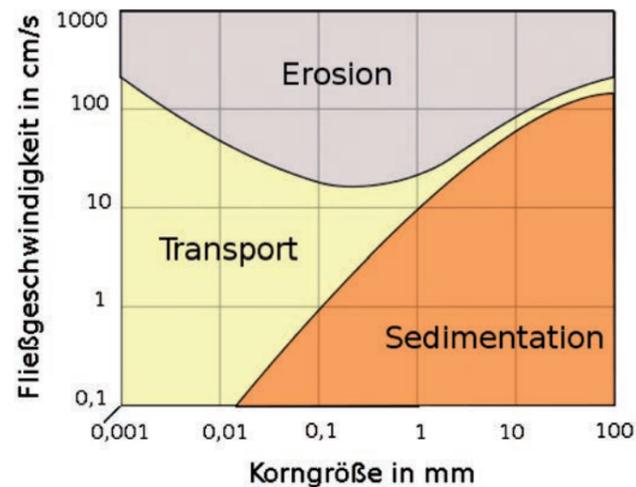


Bild 1. Grenzerte für die Stabilität von Sedimentablagerungen nach [15].
Fig. 1. Limit values for the stability of sediment deposition according to [15].

verankerte Stahlkonstruktionen zur Ausführung, während für Ölbohr- und Förderplattformen in der zentralen und nördlichen Nordsee bei Wassertiefen von 70 m (Ekofisk) bis ca. 150 m (Cormorant A, Brent) Schwergewichtsplattformen eingesetzt wurden. Aufgrund der großen Wassertiefen mit bereits stark reduzierter Seegangseinwirkung wurden von den Schwergewichtsplattformen, die alle mit Kolksschutzzeineinrichtungen ausgerüstet wurden, keine bedeutenden Kolkprobleme berichtet [5]. Bei den Stahlkonstruktionen, errichtet in Wassertiefen von 10 bis 30 m, gab es mit Kolkstiefen von 2 bis 4 m (maximal sogar 7 m) deutlich größere Kolke als erwartet und selbst bei bindigen Bodenschichten (mud plates) gab es 0,5 m mächtige Erosionen in nur einer Winterperiode.

Die Kolkbildung an Offshore-Bauwerken hängt von vielen Einflussgrößen ab:

- Geometrie des Bauwerks (Ausmaße und Gestalt des Bauwerks, Abstand von Pfählen, Anordnung von Steifen),
- Strömungsverhältnisse (Tideströmung, Strömung aus Wind und Seegang mit Richtung und Stärke, Wassertiefe/Wasserstand),
- Bodenparameter (Korngrößen, Kornverteilung, Lagerungsdichte, spezifisches Gewicht).

Aktuell gibt es immer noch große Unsicherheiten bei der Berechnung möglicher Kolkstiefen [9]. Auch hydraulische Modellversuche sind über Maßstabsprobleme mit Unsicherheiten bei der Kolkstiefenermittlung behaftet. Daher sollten entsprechende hydraulische Modellversuche möglichst großmaßstäblich – wie am Großen Wellenkanal (GWK) des Forschungszentrums Küste (FZK), Hannover – im Maßstab 1:10 durchgeführt werden. Hydraulische Modellversuche ermöglichen den qualitativen Vergleich der Wirksamkeit verschiedener Kolksschutzmaßnahmen.

Grundsätzlich zu beachten ist, dass Sand schon bei vergleichsweise sehr geringer Fließgeschwindigkeit von etwa 0,1 m/s in Bewegung gerät (Bild 1) und sich Kolke besonders bei Extremereignissen (Sturm) sehr schnell entwickeln können. Die unbefriedigende Erfahrung mit Sand-

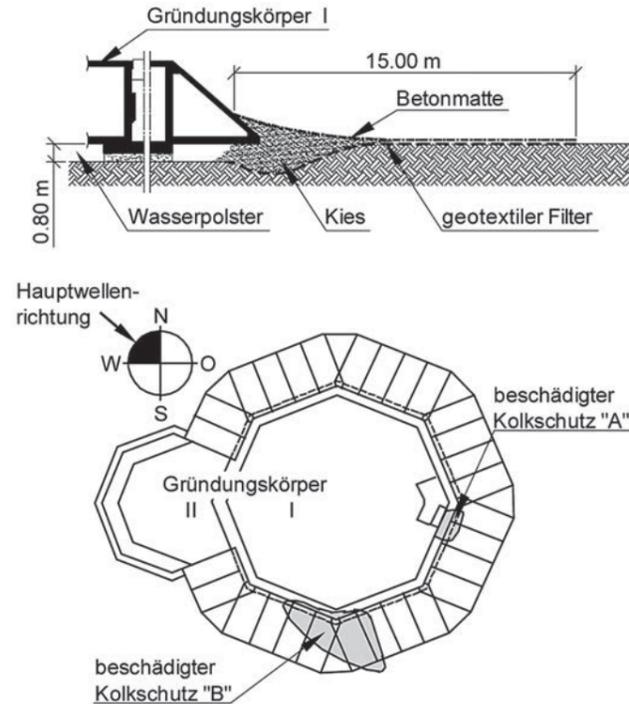


Bild 2. Erneuerter Kolksschutz, Forschungsplattform Nordsee 1979 mit erneuten Schäden nach einem Winter (1980).
Fig. 2. Renewed scour protection to a research platform in the North Sea in 1979 with renewed damage after one winter (1980).

säcken für den Kolksschutz [5], die mit späteren Erfahrungen z.B. bei der Kolkverfüllung am Eidersperrwerk übereinstimmt [7] [13], ist auf die Anwendung von Geweben zurückzuführen, da Vliesstoffe mit ihren produkttechnischen Vorteilen noch nicht zur Verfügung standen.

Berichtenswerte Erfahrungen mit Kolksschutzvarianten wurden auch an der Forschungsplattform Nordsee, die 1975 etwa 40 Seemeilen nordwestlich von Helgoland in ca. 30 m Wassertiefe errichtet wurde, gemacht. Initialschäden am ursprünglich ausgeführten Kolksschutz und die Erprobung verschiedener Kolksschutzvarianten am Gründungskörper der Plattform sind in *Maidl und Stein* [10] und *Heerten* [5] beschrieben. Ein komplett neuer Kolksschutz am Hauptgründungskörper wurde 1979 ausgeführt. Wie Bild 2 zeigt, wurde eine umlaufende Kolksschutzschürze aus geotextilem Filter, Kiesauffüllung und Betonmattenabdeckung über 15 m Länge ausgeführt. Nach nur einem eher ruhigen Winter (mit geringer Sturmaktivität) zeigten sich die in Bild 2 dargestellten Schadensbereiche mit umgeklappter Betonschutzmatte bzw. neuer Auskolkung.

Wie durch *Führböter und Manzenrieder* [3] nachgewiesen wurde, entstand dieser erneute Schaden durch Überlagerung von sich unterschiedlich schnell fortpflanzenden Wasserdrücken unter und über der Gründungsplattform. Eingetragen durch eine offen gebliebene Spalte zwischen den Gründungskörpern I und II pflanzten sich durch Seegang erzeugte Druckwellen im Wasserkörper unter dem Gründungskörper (vgl. Bild 2) mit Schallgeschwindigkeit ($c_{\text{seewasser}} = 1.500 \text{ m/s}$) fort, während der von der Wasseroberfläche wirkende Wellendruck sich mit Wellengeschwindigkeit in Wellenrichtung fortpflanzt. Durch diese Phasenverschiebung konnten sich Wasser-

überdrücke aufbauen, die den Kolksschutz von unten angehoben und teilweise zerstört haben (vgl. Bild 2, beschädigter Kolksschutz A und B). Auf diese Weise haben sich Entlastungsöffnungen auf der Leeseite des Gründungskörpers gebildet. Diese Erfahrungen unterstreichen, dass Wasserkörper unter einer Fundamentplatte, wie an der Forschungsplattform Nordsee, verfüllt oder bautechnisch von den seegangsbedingten Druckschwankungen, z.B. durch eine Stahl- oder Betonschürze abgeschottet werden müssen [5].

2.2 Aktuelle Erfahrungen mit Offshore-Windenergieanlagen

Nach dem Bau und der Inbetriebnahme der Forschungsplattform FINO 1 im Jahr 2003 und dem Bau und der Inbetriebnahme von zwölf Windenergieanlagen (sechs REpower 5M mit Jacket-Gründung (Bild 3) und sechs Multibrid M5000 mit Tripod-Gründung (Bild 4)) und eines Jacket-gegründeten Umspannwerks als Test- und Forschungswindpark „alpha ventus“ im Herbst 2009 nordwestlich von Borkum in der südlichen Nordsee auf ca. 30 m Wassertiefe wurden erste Ergebnisse von Veränderungen am Meeresboden im Windpark veröffentlicht: Nach nur einer eher ruhigen Winterperiode ohne außergewöhnliche Stürme haben sich im Zentrum der Tripod-Gründungseinheiten bis zu 6 m tiefe Kolke gebildet, während an den Führungsrohren/Rampfpfählen Kolkstiefen von bis zu 4,50 m gemessen wurden. An den Gründungspfählen der Jackets der REpower-5M-Anlagen sind ebenfalls Kolke bis 4,50 m entstanden. An der kleineren Jacket-Struktur von FINO 1 sind seit der Inbetriebnahme (2003) maximale Kolkstiefen von 3,30 m entstanden. Die anfangs auf die Beine beschränkte Auskolkung hat sich inzwischen auch auf das Zentrum der Jacket-Struktur ausgeweitet, und es ist zu einer flächigen Kolkung gekommen mit entsprechender Sedimentation in Lee der Hauptwellenrichtung.

„die tageszeitung“ (taz.de, 7.6.2010) berichtet über die aktuellen Ergebnisse wie folgt: „Die Anlage ist gewaltig – das Loch ist es auch: Bis zu sechs Meter tief hat das Meer den Boden unter den „Multibrid“-Windkraftanlagen der Firma Prokon in der Nordsee ausgespült. Dieses „Auskolken“ am Fuß des 160 Meter hohen Windrades kann dessen Stabilität bedrohen. Die Teilnehmer eines Hamburger Workshops über die ökologischen Begleituntersuchungen zum deutschen Testfeld für Windparks auf hoher See zeigten am Montag überrascht über diesen starken Effekt. Die Forscher haben auch festgestellt, dass sich das Sediment in einem 50-m-Kreis um die Anlagen herum gelockert hat.“

Bei Auswertung der Erfahrungen zur Kolkbildung an den Gasförderanlagen in der südlichen Nordsee und Richtwerten aus der Literatur zur Kolkstiefenentwicklung an schlanken Einzelpfählen bei kombinierter Strömungs- und Wellenbelastung sind folgende Kolkstiefen zu erwarten und sollten eigentlich nicht überraschen:

- $S = 1,4 \text{ bis } 1,9 \cdot D$ [1]
- $S \leq 2,5 \cdot D$ [Germanischer Lloyd] [9])

mit

- S Kolkstiefe [m]
- D Pfahldurchmesser [m].



Bild 3. REpower 5M auf „alpha ventus“ installiert.
Fig. 3. REpower 5M installed on „alpha ventus“.



Bild 4. Multibrid M5000 auf „alpha ventus“ installiert.
Fig. 4. Multibrid M5000 installed on „alpha ventus“.

Der Ansatz nach CERC [1] berücksichtigt einen Zuschlag von 10 % bei kombinierter Strömungs- und Wellenbelastung.

An den Jacket-Gründungsstrukturen von FINO 1 und den REpower-5M-Anlagen ergeben sich bei Pfahldurchmessern von 1,5 m (FINO 1) bzw. 1,8 m (REpower 5M) und maximal gemessenen Kolkstiefen von 3,3 m bzw. 4,5 m relative Kolkstiefen von maximal:

- S/D = 2,2 (FINO 1)
- S/D = 2,5 (REpower 5M)

Damit liegen die Messwerte und ermittelten relativen Kolk-tiefen über bzw. an der oberen Grenze der Richtwerte aus der Literatur. Bei Wertung dieser Angaben muss beachtet werden, dass – wie die Entwicklung des Kolkprozesses bei FINO 1 zeigt – nach nur einer Winterperiode die Kolkentwicklung an den REpower-5M-Anlagen nicht abgeschlossen sein muss und dass während eines schweren Orkans kurzfristig noch größere Kolke auftreten können.

Der Tripod-Gründungskörper der Multibrid-M5000-Anlage ist nicht mehr als aufgelöste Pfahlstruktur anzusehen und die Richtwerte zur Kolk-tiefenentwicklung von schlanken Einzelpfählen sind hier offensichtlich nicht mehr anwendbar. Die mit einem Durchmesser von 2,4 m deutlich dickeren Ankerpfähle und der konische Zentralschaft von 4,50 bzw. 6,50 m Durchmesser erzeugen eine die gesamte innere Gründungsfläche erfassende Auskolkung mit Kolk-tiefen bis 4,50 m an den Ramppfählen und bis zu 6 m unter dem Zentralschaft. Auch hier gilt, dass die Kolkbildung nach dem ersten Winter noch nicht abgeschlossen sein muss und dass bei einem entsprechend starken Sturmereignis temporär oder langfristig tiefere Kolke entstehen können.

Auf diese geschilderten Unsicherheiten ist die Gründungstiefe der Pfähle abzustimmen, oder es ist möglichst vor Beginn der Rammarbeiten ein stabiler Sohlerosionschutz einzubauen.

3 Belastungen aus Wind, Seegang und Strömungen in der südlichen Nordsee

In der südlichen Nordsee am Standort des Windparks „alpha ventus“ 45 km nördlich der ostfriesischen Insel Borkum ist seit 2003 die Messplattform FINO 1 in Betrieb und liefert ständig Messwerte von Wind, Seegang, Luft- und Wassertemperatur. In diesem Messzeitraum wurden während des Orkans „Britta“ am 1. November 2006 die bisher höchsten Wellen mit $H_{max} \sim 16$ m und $H_s = 9,77$ m gemessen [2].

Der Orkan „Tilo“ am 9. November 2007 entwickelte mit $H_s = 10,5$ m signifikante Wellenhöhen in der gleichen Größenordnung. Im zeitlichen Umfeld dieses Orkans traten im Zeitraum von einer Woche immer wieder signifikante Wellenhöhen von $H_s = 6$ bis 7 m auf mit zugehörigen Wellenperioden von $T \sim 12$ s und Wellenlängen um $L \sim 200$ m aus Nordwest (320°), die sicherlich von maximalen Wellenhöhen von $H_{max} = 10$ bis 12 m begleitet wurden. Ein Seegang, bei dem auch bei durch Windstau auf maximal 35 m erhöhten Wassertiefen in Sohl-nähe durch bereits sehr starken Flachwassereinfluss vom Seegang verursachte Orbitalbewegungen mit Strömungsgeschwindigkeiten – ungestört durch eine Offshore-Anlage – von 3 bis 4 m/s regelmäßig auftreten werden. Im Nahbereich eines schlanken Pfahls kann sich diese Geschwindigkeit durch Stau-effekte vor dem Pfahl noch auf 6 bis 8 m/s verdoppeln (Bild 5). Damit sind die seegangserzeugten Strömungen für die Hydrodynamik an der Sohle maßgebend, und Strömungskomponenten aus Tide oder Wind sind bei Wertung der Genauigkeit, mit der die sohl-nahe, seegangs-

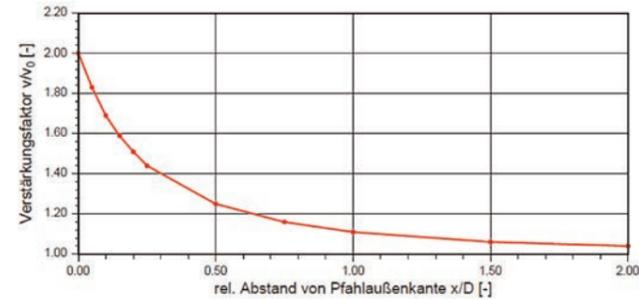


Bild 5. Strömungsverstärkung um einen schlanken Pfahl als Funktion des relativen Abstands x/D von der Pfahlußenkante [8].

Fig. 5. Current amplification around a slender pile as a function of the relative distance x/D from the outer edge of the pile [8].

induzierte Strömung im Nachbereich eines Pfahls überhaupt vorhergesagt werden kann, mit 0,5 bis 1,0 m/s [8] von untergeordnetem Einfluss.

4 Vorschlag für einen Kolktschutz aus Vliesstoff-Sandcontainern (VSC)

Im Rahmen dieses Berichts kann auf Seegangstatistik und Auswahl eines 25- oder 50-jährigen Bemessungsereignisses nicht eingegangen werden. Auf bestehende Unsicherheiten bei der Bestimmung der tatsächlichen hydrodynamischen Belastung der Meeressohle oder eines Kolktschutzes im Nahbereich einer OWEA und bei der Bemessung des Kolktschutzes wird noch einmal hingewiesen. Als Bemessungsereignis für den Kolktschutz wird für eine OWEA in der südlichen Nordsee von einer kennzeichnenden Wellenhöhe $H_s \sim 10$ m bei zugehöriger Periode von $T_s \sim 12$ s und einer Wellenlänge von $L_s \sim 200$ m ausgegangen. Daraus ergibt sich eine sohl-nahe Strömungsbelastung am Meeresboden oder am Kolktschutz unmittelbar am Pfahl von etwa $u = 8$ m/s, die sich im Abstand eines halben Pfahldurchmessers und im Abmessungsbereich eines Kolktschutzelements (Felsblock, Betonelement oder VSC) mit Berücksichtigung von Überlagerungen aus Tide- und Windströmung auf etwa 6 m/s reduzieren. Eine ereignisbezogene Überschreitung dieser Belastungsgrößen durch höhere Einzelwellen im Wellenspektrum mit bereits gemessenen maximalen Wellenhöhen H_{max} von rd. 16 bis 18 m wird bei sonst konservativ gewählten Bemessungsansätzen in Kauf genommen. Dies kann vor dem Hintergrund akzeptiert werden, dass die OWEAs einschließlich der Kolkbildung oder des Kolktschutzes regelmäßig überwacht und kontrolliert werden müssen und sich der Kolktschutz – ausgeführt wie vorgeschlagen – relativ leicht reparieren lässt.

Ansätze, die eine Schubspannung entsprechend der Erosionswiderstandsfähigkeit (Bewegungsbeginn) von Böden nach den bekannten Verfahren aus der Literatur zugrunde legen, sind bislang für Vliesstoff-Sandcontainer (VSCs) noch nicht verfügbar, sodass auf praktische Erfahrungen und großmaßstäbliche physikalische Modellversuche zurückgegriffen werden muss. Für Küstenschutzbauwerke wie Wellenbrecher, Buhnen oder Längswerke wurden Stabilitäts-gleichungen, die u.a. die Lage des VSC im Bauwerk und die sandcontainerspezifischen Verformun-



Bild 6. 1:10-Modell für Kolktschutzvarianten mit geotextilen Sandcontainern im Großen Wellenkanal (GWK) in Hannover (links: gezielt abgelegte Sandcontainer, rechts: ungeordnet geschüttete Sandcontainer), vor (oben) und nach (unten) Wellenbeanspruchung.

Fig. 6. 1:10 model for scour protection variants with geotextile sand containers in the large wave channel (GWK) in Hannover (left: sand containers placed in an intended arrangement, right: sand containers tipped without arrangement), before (top) and after (bottom) exposure to waves.

gen berücksichtigen, von Recio [12] entwickelt. Im Rahmen dieses Berichts soll auf einen einfachen, pragmatischen Ansatz für die Bemessung von Tosbecken zurückgegriffen werden. Die erforderliche Steingröße in der Sohle eines Tosbeckens kann mit

$$D_{St} = 0,04 \cdot v^2 \text{ (m)}$$

ermittelt werden. Für $v = 6$ m/s ergibt sich aufgerundet ein $D_{St} = 1,5$ m und unter Berücksichtigung eines spezifischen Steingewichts von $\gamma = 2,7$ t/m³ ein Gewicht der Einzelsteine für die Sohlsicherung von $G_{St} = 2,2$ t. Ermittelt man hieraus über das Verhältnis der spezifischen Gewichte von Steinen und Vliesstoff-Sandcontainer (VSC) von 2,7 t/m³ (Stein) zu 1,9 t/m³ (VSC) das notwendige Gewicht eines VSC, so erhält man $G_{VSC} = 3,1$ t.

Diese ermittelten Gewichte für Steine oder VSCs als Kolktschutz für die geschilderten Belastungsverhältnisse stimmen sehr gut mit bisherigen Bemessungsansätzen und Ergebnissen im Großen Wellenkanal (GWK), Hannover [14] überein. Hier wurden für Wellenhöhen von $H_s = 12,5$ m und eine Wassertiefe von $d = 21$ m erforderliche Gewichte der Sandcontainer von 3 bis 3,5 t ermittelt, bei einem Füllungsgrad der Sandcontainer von 85 %. Die Versuche am GWK haben zudem ergeben, dass die Wirksamkeit/Stabilität eines Kolktschutzes aus VSCs größer ist, wenn die VSCs unregelmäßig eingebaut bzw. geschüttet werden (Bild 6) und ein hoher Füllungsgrad angestrebt wird.

Aus dem bisherigen praktischen Einsatz von VSCs sind ihre überlegene Robustheit und Lagestabilität, aber

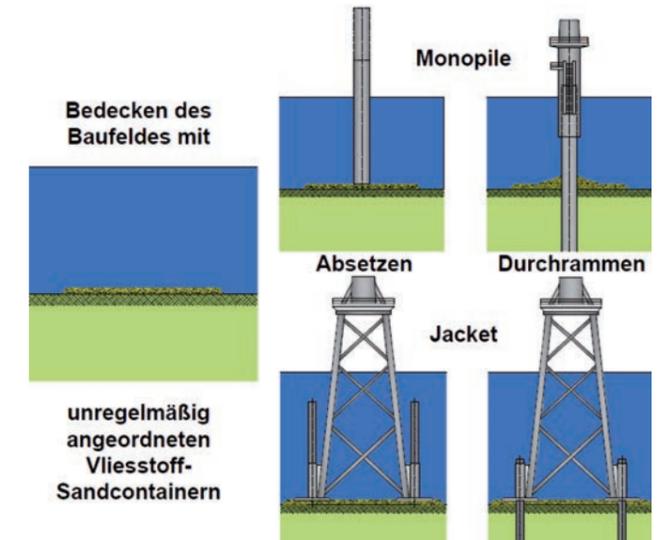


Bild 7. Einbringen des Kolktschutzes vor dem Absetzen und Rammen/Verankern der Stahlpfähle.

Fig. 7. Installation of scour protection before the placing and ramming/anchoring of the steel piles.

auch die ökologisch vorteilhafte leichte und schnelle Besiedlung mit Algen und Weichkorallen bekannt. Um die Auswirkungen des Versagens eines Sandcontainers klein zu halten und Füll- und Einbauverfahren einfach zu gestalten, sollten VSCs nach dem Grundsatz „so groß wie nötig und so klein wie möglich“ konzipiert werden.

Aufgrund deutlich geringerer Reibungsbeiwerte müssten Sandcontainer aus Gewebe etwa das doppelte Gewicht aufweisen, mit allen damit verbundenen, in der Literatur beschriebenen Handling- und Einbauproblemen.

Für alle Monopile-OWEAs oder Anlagen mit Ramppfahlverankerung wird vorgeschlagen, vor dem Absetzen der Fundamentstruktur einen 15-m-Bereich über die Ankerpfähle hinaus oder 15 m Radius um den Monopile mit zwei bis drei Lagen VSCs zu bedecken, den Gründungskörper darauf abzusetzen und die Ankerpfähle bzw. den Monopile durchzurammen (Bild 7). Damit wird eine Kolkbildung während der Bauphase, auch wenn die Bautätigkeit durch Schlechtwetter unterbrochen werden müsste, verhindert. Die kreisförmige Kolktschutzfläche von einem Monopile mit einem Durchmesser des Monopiles von etwa 5 m folgt der Dimensionierung des Kolktschutzes in [8]. Nach Verankern des Gründungskörpers können weitere VSCs im Nahbereich der Pfähle oder der Monopiles eingebaut werden, um die wirkende Vertikalspannung auf den Boden um den Ankerpfahl/Monopile zu erhöhen und einer Auflockerung des Bodens am Pfahl entgegenzuwirken. Kabel könnten auf den VSCs verlegt und dann mit zusätzlichen Sandcontainern abgedeckt und gesichert werden. Außerhalb des Kolktschutzes können die Kabel dann in den Meeresboden geführt werden.

Die Bilder 8 und 9 zeigen die bisherige Einbaupraxis von VSCs mit Steinstürzer für flächenhaften Einbau und Greifer für den Umschlag der VSCs oder gezielten Unterwassereinbau. Für den Offshore-Einsatz müssten entsprechend hochseetaugliche Fahrzeuge und Geräte mit guten Positioniereinrichtungen zur Verfügung stehen.



Bild 8. Kolkstabilisierung am Eidersperrwerk (1993): Einbau von 48.000 Sandcontainern.

Fig. 8. Scour stabilisation to the Eider flood barrier (1993): Placing of 48,000 sand containers.



Bild 9. Kolkstabilisierung am Eidersperrwerk (1993): Verladung auf Steinstürzer (220 Stück pro Ladung).

Fig. 9. Scour stabilisation to the Eider flood barrier (1993): Loading the rock dumper vessel (220 per load).

Bis zu einem Füllvolumen von ca. $V = 1,2 \text{ m}^3$ bis ca. $1,5 \text{ m}^3$ hat sich der Einsatz eines mechanisch verfestigten Stapelfaservliesstoffes mit einem Flächengewicht von $m_A = 600 \text{ g/m}^2$ bewährt, wie er auch seit Jahrzehnten erfolgreich als geotextiler Filter im Wasserbau eingesetzt wird. Für Küstenschutzmaßnahmen unter Einsatz von Megacontainern ($V = 200 \text{ m}^3$) wurden erfolgreich entsprechende Vliesstoffe mit $m_A = 1.200 \text{ g/m}^2$ eingesetzt.

Es wird erwartet, dass sich mit diesem VSC-Kolksschutzkonzept eine Kostenreduzierung für die Gründung von OWEAs erreichen lässt und die dauerhafte Standsicherheit erhöht wird.

5 Praxistest an der Messplattform Amrumbank

Seit April 2005 ist die Messplattform Amrumbank West auf einer Position von etwa $54^\circ 30' \text{ Nord}$ und $17^\circ 42' \text{ Ost}$ und damit ca. 100 km vor der schleswig-holsteinischen Westküste in der Nordsee in Betrieb. Neben den Messplattformen FINO 1 und FINO 3 werden hier in der zentralen deutschen Bucht meteorologische und hydrologische Daten zur Erforschung der Umweltbedingungen für OWEAs gesammelt. Betreiber der Anlage sind die Firmen

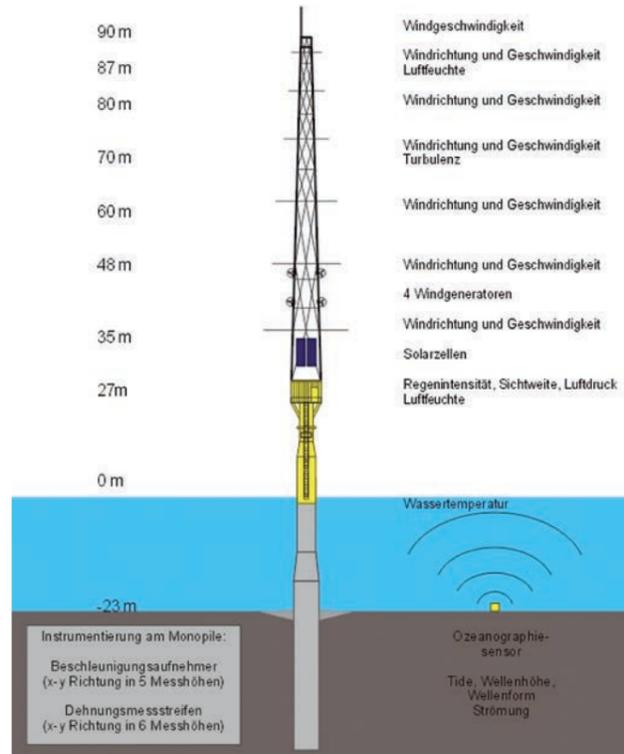


Bild 10. Messplattform Amrumbank West, messtechnische Ausrüstung (www.offshore-wind.de, Forschung und Entwicklung, Messplattformen, Projekte im Detail).

Fig. 10. Amrumbank West measuring platform, measurement equipment, (www.offshore-wind.de, research and development, measuring platforms, projects in detail).

e-on und RWE Innogy. Die Messplattform Amrumbank West besteht aus einem Monopile-Gründungskörper mit aufgesetztem Messraum und Stahlrohrgittermast. Die Gesamthöhe beträgt 135 m bei einem Gesamtgewicht von 381 t und einem Durchmesser des Monopiles an der Sohle von 3,50 m. Bild 10 zeigt eine Ansicht der Messplattform und die messtechnische Ausrüstung. Bild 11 zeigt die Messplattform bei ruhigem Wetter mit dem Messschiff „Schall“.

Als Kolksschutz wurden rund um den Monopile in 23 m Wassertiefe 450 Terrafix-Vliesstoffsandcontainer mit einem Füllvolumen von $V = 1 \text{ m}^3$ ($G \sim 1,8 \text{ t}$) eingebaut. Dieser Kolksschutz wurde seit Inbetriebnahme im Jahr 2005 über fünf Jahre mit Strömungen aus Wellen, Wind und Tide belastet, einschließlich des bei der Belastung von FINO 1 bereits erwähnten Orkans „Britta“ vom November 2006 und aller anderen Sturmereignisse dieses Zeitraums. Bei dem anstehenden sandigen Meeresboden wären nach dem zitierten Ansatz vom Germanischen Lloyd mit $S \leq 2,5 D$ (vgl. Abschnitt 2.2) Kolkstiefen von ca. 8,75 m zu erwarten gewesen. Aus Juni 2009 liegt eine Side-Scan-Sonar-Aufnahme der Firma Nordseetaucher GmbH vor (Bild 12), die den intakten Kolksschutz erkennen lässt. In Lee der Hauptwellenrichtungen aus NW und SW sind die Sandcontainer eingesandet, aber Kolkbildungen, wie sie an den anderen Strukturen (FINO 1, OWEAs „alpha ventus“) bereits nach nur einem Jahr aufgetreten sind, sind nicht zu erkennen. Damit hat der Kolksschutz inner-



Bild 11. Messplattform Amrumbank West in der zentralen deutschen Bucht [11].

Fig. 11. Amrumbank West measuring platform in the central German Bight [11].

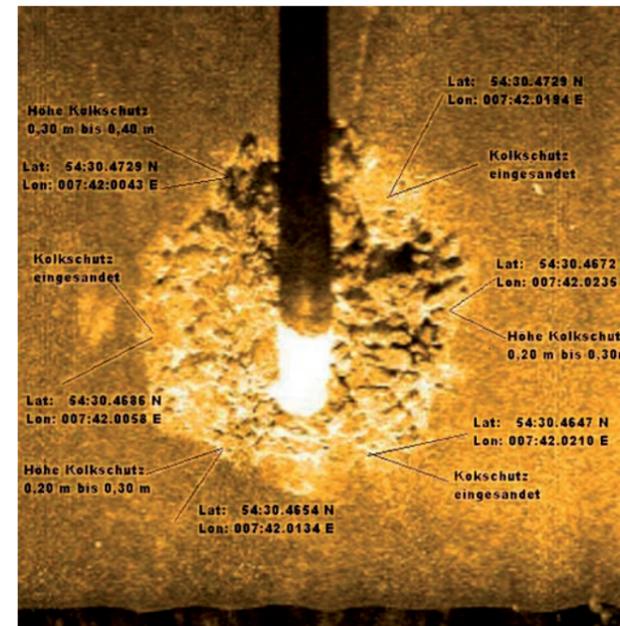


Bild 12. Side-Scan-Sonar des Kolksschutzes an der Messplattform Amrumbank West von Nordseetaucher GmbH.

Fig. 12. Side-scan sonar of the scour protection to the Amrumbank West measuring platform from Nordseetaucher GmbH.

halb der bisherigen Betriebsdauer und bei den einwirkenden Strömungsbelastungen aus Wellen, Wind und Tide alle Belastungen erfolgreich überstanden bei einem Volumen der Vliesstoffsandcontainer von ca. 1 m^3 und einem entsprechenden Gewicht von ca. 1,8 t. Hieraus darf abgeleitet werden, dass die Aussagen und Ableitungen für die Kolksschutzbemessung von OWEAs in der Nordsee in Abschnitt 4 noch auf der sicheren Seite liegen.

6 Schlussfolgerung

Kolksschutzmaßnahmen im Gründungsbereich von Bauwerken unterscheiden sich in technisch-konstruktiver Hinsicht nicht von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen. Beide Systeme benötigen einen Filter für eine stabile Grenzschicht sowie eine Deckschicht, die den hydrodynamischen Angriffen ausreichend widerstehen muss.

Vliesstoff-Sandcontainer (VSCs), gefertigt aus mechanisch verfestigten Stapelfaservliesstoffen, vereinen die konstruktiv erforderlichen Kolksschutzelemente Deck- und Filterschicht und passen sich optimal einer Kolkgeometrie an. Übergangsbereiche zum ungesicherten Sohlbereich sind gegebenenfalls flexibel, da sich die sandgefüllten „weichen“ Bauelemente den Untergrundverformungen anschmiegen. Anwendungserfahrungen mit Geotextilien im Küstenschutz umfassen bereits über 50 Jahre. Projekterfahrungen mit Vliesstoff-Sandcontainern (VSCs) als Kolksschutzsystem sind seit Anfang der 1990er Jahre vielfältig vorhanden und literaturmäßig bekannt. Auch stehen bereits Ergebnisse aus Untersuchungen zur Wirksamkeit nach zehnjähriger Freibewitterungszeit unter Seegeeseinfluss zur Verfügung.

Bei der Festlegung der Sandcontainergröße sollte immer dem Ansatz „so groß wie nötig und so klein wie möglich“ gefolgt werden. Einzelelemente (z.B. $10 \times 1 \text{ m}^3$) haben gegenüber Großelementen (z.B. $1 \times 10 \text{ m}^3$) einen Sicherheitsvorteil, da bei Schäden am Einzelelement keine relevanten Folgen für die gesamte Kolkssicherung zu erwarten sind.

Für das hier dargestellte Bemessungsszenario für OWEAs in der südlichen Nordsee bei Wassertiefen von 30 m und signifikanten Wellenhöhen von $H_s = 10 \text{ m}$ sind Vliesstoff-Sandcontainer (VSCs) mit $G_{VSC} = 3,1 \text{ t}$ (rd. 3 t) einzusetzen. Die VSCs aus mechanisch verfestigten Stapelfaservliesstoffen sind gemäß der zu erwartenden Belastungen und den produktspezifischen Eigenschaften des Vliesstoffes zu bemessen und zu fertigen. In der Fertigung, beim Füllen und beim Handling vor Ort wird bei entsprechender Akzeptanz der Bauweise noch großes Entwicklungspotenzial erwartet. Eine ausführungsbegleitende Bauüberwachung und ein regelmäßiges Kolkmonitoring werden dringend empfohlen.

Die seit April 2005 an der Messplattform Amrumbank West mit einem Kolksschutz aus ca. 450 Vliesstoffsandcontainern mit einem Füllvolumen von ca. 1 m^3 und einem korrespondierenden Gewicht von ca. 1,8 t gemachten Erfahrungen bestätigen, dass die hier vorgeschlagenen Bemessungsansätze für den Kolksschutz von OWEAs in der Nordsee noch auf der sicheren Seite liegen. Side-Scan-Sonar-Aufnahmen bestätigen, dass es am Monopile der Messplattform Amrumbank West seit April 2005 zu keiner Kolkbildung gekommen ist und damit ein großer Unterschied zu den Kolkbildungen an den Anlagen FINO 1 und „alpha ventus“ zu verzeichnen ist.

Die VSCs können vor dem Absetzen der Gründungsstruktur zwei- bis dreilagig flächig eingebaut und von Ankerpfählen/Monopiles durchrammt werden. Der Nahbereich der Pfähle ist wegen der hohen Strömungsbelastung und zur Erhöhung der Vertikalspannung im Boden krängeartig zu verstärken. Mit dieser Vorgehensweise sind

Kolkbildungen schon während der Bauphase ausgeschlossen. Es wird erwartet, dass sich mit diesem VSC-Kolk-schutzkonzept eine Kostenreduzierung für die Gründung von OWEAs erreichen lässt und die Standsicherheit dauerhaft erhöht wird. Ein positiver ökologischer Effekt ist die nachweislich sehr gute Besiedlung von VSCs mit Algen und Weichkorallen als Basis für die weitere Entwicklung artenreicher Meeresflora und -fauna.

Literatur

- [1] CERC: Coastal Engineering Manual (CEM). ASCE US Army Corps of Engineers. USA, 2001.
- [2] Fischer, G.: Forschungsplattform FINO 1. 3. Wissenschaftstage zur Offshore-Windenergienutzung im Auftrag des BMU, Oldenburg, 2009.
- [3] Führböter, A. und Manzenrieder, H.: Über Wellenwirkungen auf wassergefüllte Hohlräume. Bauingenieur 56 (1981).
- [4] N.N.: Gap in foundation technology threatens wind farm progress. Ground Engineering, February 2010.
- [5] Heerten, G.: Experience of Different Scour Protection Techniques at Offshore-Structures in the North Sea. Proceedings of the Fifth Australian Conference on Coastal and Ocean Engineering, Perth, 1981, pp. 22–28.
- [6] Heerten, G.: Geotextile containers for coastal and hydraulic engineering structures made of specially designed nonwoven geotextiles. 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil, 2010.
- [7] Heibaum, M.: Geokunststoff-Container – ein neues und nahezu unbegrenztes Anwendungsfeld. geotechnik, 25 (2002), Nr. 4, S. 254–260.
- [8] IMS & BBG: Kolkssicherung von Monopile-Gründungen mit Geokunststoffen. Hamburg/Espelkamp, 2004, unveröffentlicht.
- [9] Lesny, K.: Foundations for Offshore Wind Turbines, Tools for Planning and Design. Essen: VGE, 2010.

- [10] Maidl, B. und Stein, D.: Erfahrungen mit verschiedenen Kolksschutzverfahren an der Forschungsplattform „Nordsee“. Meerestechnik 11 (1980), Nr. 4.
- [11] Nordseetaucher GmbH: Untersuchungsbericht vom 24. Juni 2009 zum Windmessmast Amrumbank West (im Auftrag der ARGE Messmast Amrumbank, c/o HOCHTIEF Construction AG), 2009.
- [12] Recio, J.: Hydraulic Stability of Geotextile Sand Containers for Coastal Structures – Effect of Deformations and Stability Formulae. Dissertation TU Braunschweig, 2008.
- [13] Saathoff, F. und Witte, J.: Eidersperrwerk, geotextile Sandcontainer zur Stabilisierung der Kolkböschungen. Hansa 4/1994, S. 69–73.
- [14] Werth, K. und Heerten, G.: Geotextile Sohlensicherungen als effektive Filter- und Ballastschichten zur Vermeidung und Stabilisierung von Kolk an Gründungsstrukturen von Bauwerken. Geotechnik-Tag in München, TU München, 2010.
- [15] Hjulström-Diagramm, 1935. Entnommen aus Wikipedia-Enzyklopädie (<http://de.wikipedia.org/wiki/Hjulstroem-Diagramm>).

Danksagung

Für die freundliche Bereitstellung des Untersuchungsberichts der Nordseetaucher GmbH über den Zustand des eingebauten Kolk-schutzes aus Vliesstoffsandcontainern am Messmast Amrumbank West und die Zustimmung zur Publikation der dargestellten Abbildungen dieses Artikels wird den Betreibern E.ON Climate & Renewables Central Europe GmbH und RWE Innogy Wind-power Hannover GmbH herzlich gedankt.

Autoren

Prof. Dr.-Ing. G. Heerten, NAUE GmbH & Co. KG, Espelkamp
Dr.-Ing. Karsten Peters, IMS Ingenieurgesellschaft mbH, Hamburg



Geokunststoffe
Küstenschutz Offshore Wasserbau
langfristig wirksam - sichere Systemlösungen - ökologisch und ökonomisch

NAUE
NAUE GmbH & Co. KG
Gewerbstraße 2
32339 Espelkamp-Fiestel
Telefon 05743 41-0
Telefax 05743 41-240
E-Mail info@naue.com
Internet www.naue.com

NAUE
gewinnt den Publikumspreis
„Bilder der Forschung 2010“
initiiert durch das Magazin FOCUS und dem vfa.

Das Bild greift das Thema Geokunststoffe spielerisch auf - denn hier werden Menschen als sandgefüllte Säcke aus Geokunststoffen für den modernen Küstenschutz stilisiert dargestellt.

NAUE produziert für die moderne Bauindustrie ökonomische, ökologische und hochwirksame Geokunststofflösungen, für die Anwendungen im Wasserbau, Strassen- und Tiefbau, Deponiebau, Tunnelbau und für den Grundwasserschutz.

Erfahren Sie mehr auf www.naue.com



NAUE GmbH & Co. KG
Gewerbstraße 2
32339 Espelkamp-Fiestel

Telefon 05743 41-0
Telefax 05743 41-240
E-Mail info@naue.com
Internet www.naue.com





NAUE GmbH & Co. KG
Gewerbestr. 2
32339 Espelkamp-Fiestel
Telefon 05743 41-0
Telefax 05743 41-240
E-Mail info@naue.com
Internet www.naue.com



IMS Ingenieurgesellschaft mbH
Stadtdeich 7
20097 Hamburg
Telefon 040 328 18-0
Telefax 040 328 18-139
E-Mail info@ims-ing.de
www.ims-ing.de