

# SCHÄDIGUNG UND SELBSTTHEILUNG VON OWEA-GRÜNDUNGEN

Prof. em. Dr.-Ing. **G. Gudehus**, Institut für Boden- und Felsmechanik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe;

## Kurzfassung

Die Dynamik von OWEA-Gründungen ist nicht auf Schwingungen begrenzt, sondern umfasst Lage- und Dichteänderungen im Untergrund bis hin zu kritischen Phänomenen. Sie wird bestimmt durch Materialeigenschaften von Sand, die nicht einfach zu fassen sind. Ausgehend von Modellversuchen werden Mechanismen vorgestellt und erklärt, die man Schädigung und Selbstheilung nennen kann. Nach der Wirkung von Wasser in und auf Sand wird gezeigt, wie sich flache und tiefe OWEA-Gründungen in der Deutschen Bucht bei Sturm und im Normalbetrieb verhalten können. Dies führt zu Empfehlungen für Entwurf und Ausführung.

## Sandeigenschaften

Sand hat Materialeigenschaften, die vertraut erscheinen und doch physikalisch schwer zu fassen sind [1]. Eine trockene zylindrische Probe aus Korundkörnern (Abb. 1a), durch eine Membran und Vakuum seitlich gehalten, erfährt bei langsamer axialer Verkürzung wiederholt kleine Beschleunigungen, die wir an der Kopfplatte gemessen haben (b). Durch die Belastung verklemmen sich Körner bis zur Stabilitätsgrenze, verdrehen und entspannen sich ruckartig und erzeugen so Wärme und polarisierte Stoßwellen. Dadurch verändern sich Kräfte und Bewegungen übertragende Kornketten, das Korngefüge erfährt Umlagerungen und Druckumverteilungen. Die von *Mikroseismik* begleitete Entropieproduktion ist wegen der gegenseitigen Verstärkung seismogener Stellen (innerhalb der Reichweite der Stoßwellen) maximal im Rahmen von Randbedingungen und Erhaltungssätzen. Die seismischen Pulse sind unabhängig vom Druck fraktal verteilt, sie erscheinen auch wegen verschiedener Entfernungen an einem Seismometer unterschiedlich. Das daher rührende Knirschen ist bei einer bestimmten Verformung lauter, wenn die zugehörige Zahl von Pulsen in kürzerer Zeit auftritt.

Bei monotoner Verformung, d.h. ohne Anhalten und Umkehr, stellt sich hörbar nach kurzem Übergang eine zum Betrag der Verformungsrate proportionale seismo-granulare Temperatur

$T_g$  ein (monotoner Attraktor). Danach ist das Verhalten *hypoplastisch*, entsprechende Materialgleichungen haben sich seit über 15 Jahren bewährt. Dafür wurde kürzlich eine energetische Begründung gegeben, in der die Thermodynamik durch eine Seismodynamik erweitert wird [2]. Die den Kornkontakten entsprechend druck- und dichteabhängige elastische Energie ist im hypoplastischen Bereich viel größer als die (zu  $T_g^2$  proportionale) seismische Energie, die dennoch durch Fokussierung auf wenige Kornkontakte aktivierend wirkt.

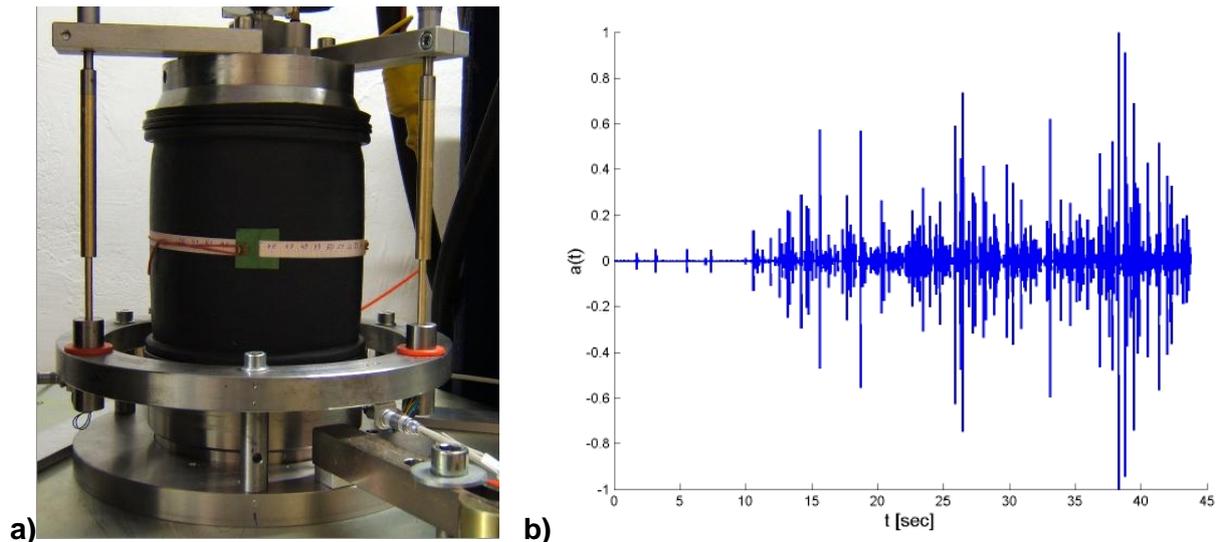


Bild 1: a) Granulatprobe unter Vakuum mit Gummihülle, b) Beschleunigung an der Kopfplatte bei deren langsamer Belastung

Bei fortgesetzter monotoner Verformung verliert eine Sandprobe an *Zustandsgrenzen* ihre anfängliche Uniformität. Spontan bilden sich je nach Dichte kontraktante oder dilatante Scherbänder, oder das Korngefüge zerfällt durch Aufreißen. Dann ist die elastische Energie an der Konvexitätsgrenze, und polare Größen entstehen mit hörbar zunehmender Seismik in durch maximale Dissipation bevorzugten Richtungen. Solche *kritischen Phänomene* (seltsamer Attraktor) werden hypoplastisch besser mit polaren Größen als ohne diese erfasst. Zustandsgrenzen eignen sich zur Bestimmung hypoplastischer Kenngrößen, ihre genaue physikalische Erfassung ist schwierig.

Wird eine Sandprobe volumentreu (z.B. wassergesättigt undrännert) mit kleiner Amplitude *zyklisch verformt*, tendieren die Kornspannungen mit einem Zickzack-Pfad zu Null (Bild 2a). Die Körner entspannen sich durch wiederholte winzige Drehungen bei unverändertem mittleren Abstand. Bei größerer Dichte oder Amplitude tendiert der Spannungspfad zu einem Doppelzyklus, dann ent- und verspannen sich die Körner periodisch. Mit physikalisch schwer

erklärbaren inneren Variablen werden solche zyklischen Attraktoren elastoplastisch oder hypoplastisch einigermaßen reproduziert. Dies gilt auch für *Ratcheting* genannte volumentreue Verformungen im Pilgerschritt, die zu linsenähnlichen zyklischen Attraktoren führen (b). Dann entspannen sich die Körner weniger als ohne mittlere Gefügeverformung. Solche Vorgänge sind energetisch mit pulsierender Seismik erklärbar und am Knirschen hörbar: Das Verhalten ist abwechselnd fast elastisch und hypoplastisch.

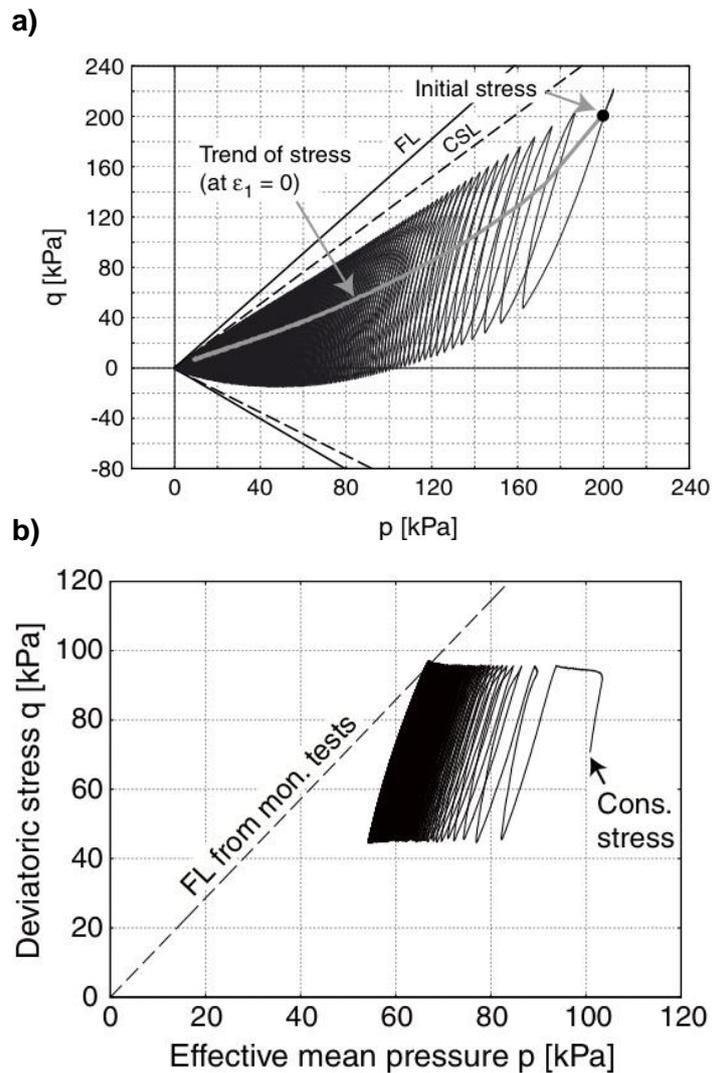


Bild 2: Spannungspfade einer gesättigten undrännierten Sandprobe [3] bei zyklischer Verformung (a) und Ratcheting (b) mit kleinen Amplituden

Bei konstantem mittleren Korndruck bewirken zyklische Gestaltänderungen mit kleiner Amplitude eine *Verdichtung* bis nahe einer druckabhängigen Porenzahluntergrenze. Bei mäßigen Amplituden ist die Verdichtung geringer, im Attraktor wechseln sich Dilatanz und

Kontraktanz ab. Bei großen Amplituden werden wiederholt Zustandsgrenzen erreicht, wobei sich Scherbänder mit *Auflockerung* und polaren Größen ausbilden. Letztere verschwinden wieder durch Verformungszyklen im subkritischen Bereich. Dieses Verhalten wird durch hypoplastische Stoffgesetze besser als durch elastoplastische erfasst, es beruht wie bei konstanter Dichte auf pulsierender Seismik.

Kumulative Form- und Zustandsänderungen erfordern bei vielen Richtungswechseln mit den genannten Materialgleichungen einen übergroßen Rechenaufwand und sind insoweit numerisch fehleranfällig. Ein Ausweg sind Relationen für Periodenmittelwerte mit Einflussfaktoren aus fast zyklischen Änderungen in einer Periode. In einem derartigen *Akkumulationsmodell* wird eine hypoplastische Fließregel mit empirischen Intensitätsfaktoren verbunden [4]. Dieses wurde unlängst energetisch begründet und verbessert: Die Fließregel enthält nun einen seismischen Druck, und als Intensitätsfaktor dient das Periodenmittel der granularen Temperatur [5].

*Wassersättigung* verändert das Materialverhalten, obwohl oder gerade weil die Korneigenschaften vom Porenwasserdruck  $p_w$  unabhängig sind. Maßgebend ist der Korn- oder Effektivdruck  $p_s = p - p_w$ , wobei der Totaldruck  $p$  zusammen mit dem nur vom Korngefüge übertragenen Spannungsdeviator die Impulsbilanz bestimmt. Bei geringer Dichte geht ein gesättigtes Korngefüge durch monotone volumentreue Verformung über in eine Suspension, nach Anhalten wird daraus wieder ein Korngefüge. Der Zerfall eines dichten Korngefüges durch zyklische volumentreue Verformung (Abb. 1a) erzeugt dagegen keine Suspension, denn bei anschließender volumentreuer Verformung entsteht wieder Korndruck. Hydraulische Gradienten bedingen (Darcy) und Dichteänderungen erfordern (Diffusion) Sickerströmungen, solange sich keine Kanäle in zerfallendem Korngefüge bilden.

*Kavitation* kann mit gesättigten Sandproben unterschiedlich auftreten.  $H_2O$ -Dampfblasen bilden sich bei  $p_w = 0$ , das kann allerdings bei OWEA- Gründungen ab ca. 15m Wassertiefe kaum vorkommen. Dafür hat auch Lufteintritt am Probenrand keine Bedeutung. Eine Probe löst sich ohne solche Phasenübergänge von ihrer Hülle, wenn dort  $p = p_w$  ist. Ein dichtes Korngefüge bricht bei rascher Verformung auf, wobei dilatante Scherbänder zu Rissen entarten und dort der Korndruck infolge Porenunterdruck nicht sofort verschwindet. Durch den Unterdruck dringt über die Risse Wasser ein, das Korngefüge zerfällt und es entsteht eine Suspension. Ein lockeres Korngefüge reißt bei langsamer Verformung durch lokalisierte kontraktante Scherung auf, gibt dabei Wasser ab und wird so etwas dichter.

Solche kritischen Phänomene von Sand unter Wasser konnte man bislang nicht quantifizieren.

Auch die *Suspensionsdynamik* ist noch nicht genügend geklärt. Die Bewegung der Körner fluktuiert durch gegenseitige Stöße und Wasserdruckpulse. Anders als bei Korngefügen ist der wärmeähnliche Teil der kinetischen Energie proportional zur granularen Temperatur. Der Kornanteil hat einen seismischen Partialdruck, hinzu kommt ein seismo-viskoser Widerstand und der Diffusionswiderstand bei hydraulischen Gradienten. Die Energetik ist wegen der hydraulischen Lokalisierung bei Dichteänderungen verwickelt.

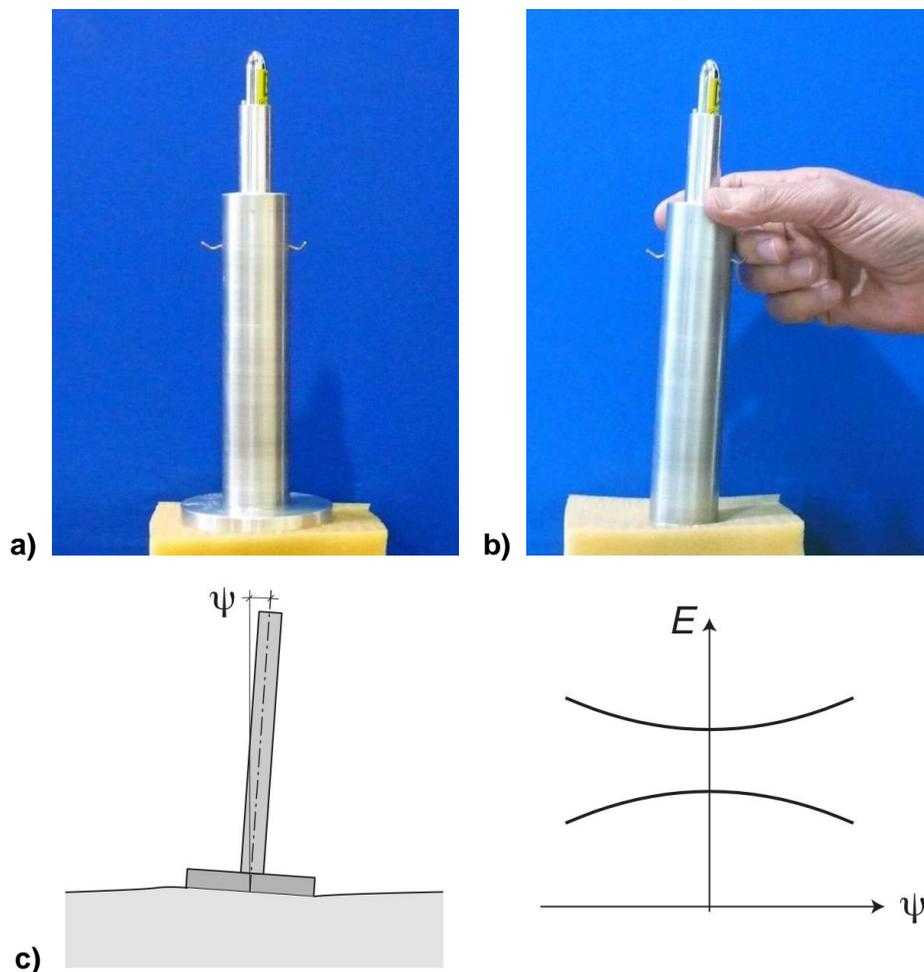


Bild 3: Modellturm auf poroelastischer Basis mit großer (a) und kleiner Grundplatte (b), Gesamtenergie versus Neigung (c)

### Modellversuche

In Modellversuchen mit einem Turm sind Lageänderungen bei Wechselbeanspruchung erkennbar. Mit einem Schwamm als *poroelastischer* Basis (Abb. 3) und einer genügend

großen Fundamentplatte (a) oszilliert der Turm um die aufrechte Position, diese ist somit ein Attraktor. Mit zu kleiner Fundamentplatte (b) bleibt der Turm nicht in aufrechter Position, diese ist dann ein Repeller. Das System ist stabil, wenn die Summe  $E$  von elastischer und gravitativer Energie bezüglich der Turmneigung minimal ist, andernfalls ist es labil (c). An einem *kritischen Punkt* dazwischen ist es indifferent. Allgemeiner ist für konservative Systeme an kritischen Punkten die Energie  $E$  bezüglich ihrer Freiheitsgrade an der Konvexitätsgrenze, d.h. für bestimmte Richtungen (Eigenvektoren = Moden) ändert sich  $E$  in zweiter Näherung nicht (im Gleichgewicht verschwinden Energieänderungen erster Ordnung).

Ganz anders verhält sich ein Turm auf *trockenem Sand* (Abb. 4). Man kann Wechsellasten durch eine angehängte Schaukel aufbringen und Turmneigungen mit einem Laserpointer an der Decke erkennen. Mit der größeren Fundamentplatte (a) bleibt der Turm im Lot, sackt aber selbst in dichten Sand allmählich ein. Nach einer Verkantung dreht sich der Turm durch Wechsellasten zurück und sackt etwas ein (im Periodenmittel monotoner Attraktor). Diese *Selbstheilung* genannte Stabilisierung erfordert einen Ring und einen Hohlraum unter der Platte. Wenn die Platte in der Mitte wie auf einem Sattel reitet, nimmt dagegen die Verkantung durch Wechsellasten wegen zunehmender Auflockerung am Plattenrand allmählich zu (Repeller). Mit der kleinen Platte (b) nimmt die Verkantung durch Wechsellasten rasch zu, bis der Turm bei kritischer Neigung von selbst umkippt (seltsamer Attraktor).

Einen Einblick vermittelt der Verlauf der Summe  $E$  von elastischer und gravitativer Energie mit der Zahl  $N$  der Lastwechsel (c). Der Schwereanteil dominiert mit harten Körnern und kompaktem Turm, die seismische Energie ist wie bei Proben viel kleiner. Die thermische Energie ist zwar größer als die elastische, infolge Konduktion aber praktisch konstant und bei harten Körnern ohne Einfluss. Bei Stabilisierung (S) nimmt  $-dE/dN$  mit zunehmendem  $N$  ab, bei Destabilisierung (D) nimmt es zu. Abgesehen von einem kleinen Relaxationsanteil beruht dies auf der Absenkung des Turmschwerpunkts und sich verdichtenden Sandes durch pulsierende Seismik im subkritischen Bereich. Die lotrechte Turmstellung ist ein Attraktor, wenn  $-dE/dN$  nur durch Sackung kleiner als mit Verkantung ist, andernfalls ist sie ein Repeller. Die seismisch induzierte Entropieproduktion ist bei einer Selbstheilung mit Rückdrehung größer als ohne diese. Am kritischen Punkt wird  $E$  durch Zunahme der kinetischen Energie des Turms dramatisch kleiner, nach dem Umkippen bleibt es auf niedrigerem Niveau.

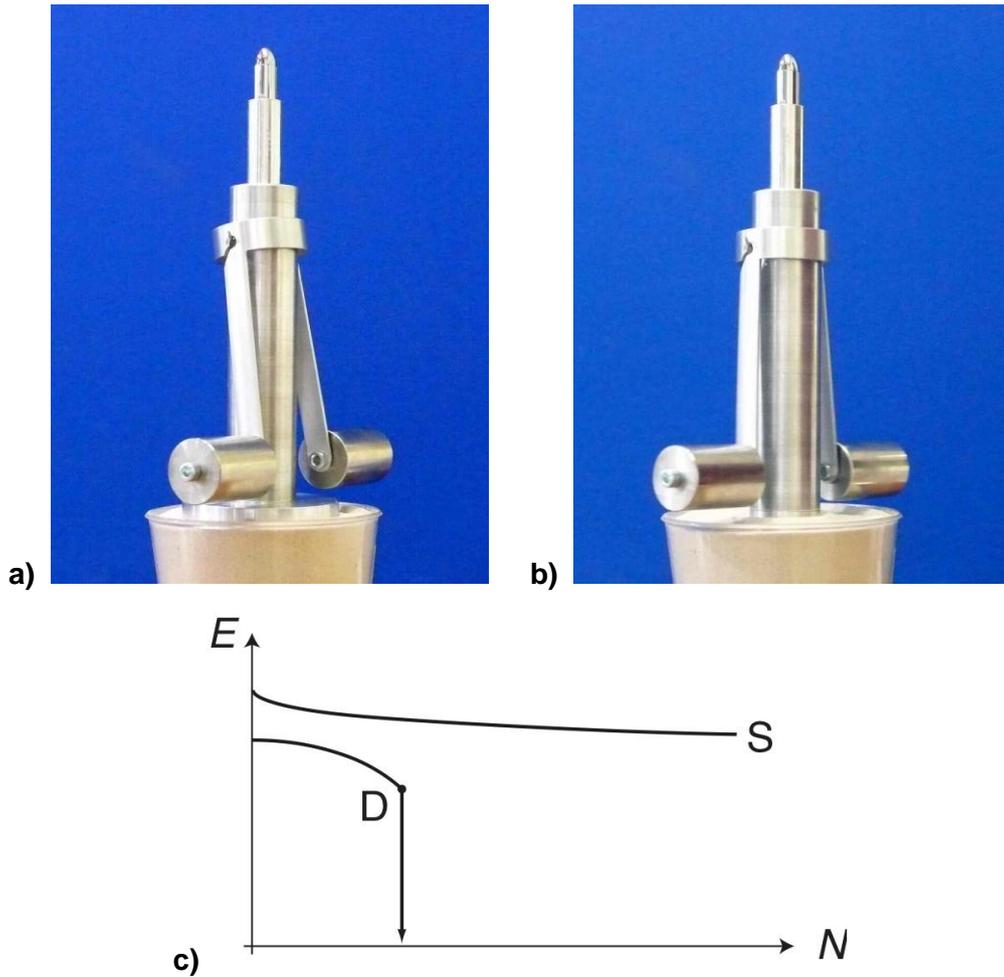


Bild 4: Modellturm auf dichtem trockenem Sand mit großer (a) und kleiner Grundplatte (b), Gesamtenergie versus Anzahl von Lastwechseln (c)

In aufwändigeren Modellversuchen mit pneumatisch wechselnd belasteter Platte auf dichtem Sand wurde nach Verkantung eine mehr oder weniger weit gehende Rückdrehung mit Turmsackung beobachtet [6,7]. Dichteänderungen waren dabei schwer messbar. Realistische Verkantungen und Auflockerungen durch extreme Belastung (einmal oder wenige Male) wurden mit einem hypoplastischen Stoffgesetz berechnet. So ergaben sich auch Rückdrehung und Wiederverdichtung durch viele kleine Lastwechsel, und ungefähr mit einem Akkumulationsmodell. Diese Selbstheilung kann man damit begründen, dass der Sand sich vorher durch Verkantung am Fundament luvseits (Hebung) mehr als leeseits (Eindringung) auflockert und danach hier weniger als dort durch Wiederverdichtung sackt. Die zum Umkippen führende kritische Neigung kann man mit Grundbruchformeln für exzentrische Last abschätzen. Energetische Berechnungen im obigen Sinn stehen noch aus, vor allem die spontane Zunahme der kinetischen Energie an einem kritischen Punkt (Kon-

vexitätsgrenze der Gesamtenergie) ist mit Umlagerungen schwerer als ohne diese zu erfassen: Seismik gehört dazu, und anders als bei konservativen Systemen ändern sich die Freiheitsgrade.

Selbstheilung wurde auch in Modellversuchen mit einem am Kopf horizontal wechselbelasteten *Einzelpfahl* in trockenem Sand beobachtet [8]. Dafür darf der Pfahlfuß sich bei der vorangehenden größeren Belastung nicht verdrehen, und der Pfahl darf nicht zu biegsam sein. Günstigenfalls bewirken Wechsellasten komplette Biegeentspannung des Pfahls und Wiederverdichtung des benachbarten Sandes. Danach ist die durch eine größere Belastung erhöhte Summe  $E$  von elastischer und gravitativer Energie infolge pulsierender Seismik wieder so groß wie vorher. Bei einer größeren Belastung und zu geringer Einbindetiefe verdreht sich der Pfahlfuß, dann führen kleinere Wechsellasten nur zu einer Wiederverdichtung, denn ohne Rückdrehung findet die Gesamtenergie  $E$  so ein höheres Minimum. Ein zu biegsamer Pfahl wird selbst ohne Fußverdrehung nach Verbiegung durch Wechselbelastung am Kopf nicht wieder gerade, weil die von dort erzeugte Seismik zu einem höheren Minimum von  $E$  führt.

Diese Vorgänge lassen sich nur teilweise rechnerisch erfassen. Empirische Bettungsansätze mögen zur Schnittkraftschätzung taugen, sagen aber zur Auflockerung am Pfahl nichts und versagen bei Wechselbeanspruchung, weil dann Seitendruck und Pfahlverschiebung nicht mehr zugleich Null sind. So kann man auch Pfahlverschiebungen infolge Extrembelastung nicht vorhersagen. Mittels Hypoplastizität erhält man diese zutreffend, und auch Dichteänderungen am Pfahl. Die anschließende Selbstheilung ergibt sich mit einem Akkumulationsmodell recht realistisch, daran ist aber noch zu arbeiten.

Mit *Pfahlgruppen* in trockenem Sand haben wir keine derartigen Modellversuche durchgeführt, sie lassen sich aber aufgrund von Untersuchungen mit axial wechselbelasteten Pfählen beurteilen [9]. Eine am Überbau angreifende Horizontalkraft wird über die Pfahlschäfte in den Boden übertragen, das Moment bewirkt eine axiale Pfahlbelastung nach oben luvseits und nach unten leeseits. Die Mantelreibung kann mit dichtem Sand durch Dilatanzbehinderung groß sein, die Verspannung nimmt aber durch Wechsellasten ab. Da der Fußwiderstand das Eindringen verringert, verkanten sich Pfahlgruppen mit Schwerpunkthebung. Der Sand nahebei lockert sich durch eine bis zu Zustandsgrenzen führende Belastung auf. Viele kleine Lastzyklen bewirken danach zwar eine Wiederverdichtung, aber keine Rückdrehung, denn damit wäre die Entropieproduktion nicht

größer.

Empirische Ansätze für axiale und laterale Bodenwiderstände dienen allenfalls zur Vorbemessung, können aber die reale Entwicklung kaum erfassen. Die zugleich axialen und lateralen Verschiebungen von Pfählen relativ zum Boden erzeugen mehr Seismik als mit nur einem von beiden Anteilen. So verringert sich der Bodenwiderstand, und durch Wechselbelastung kommen Pfahlgruppen allmählich hoch (die Gesamtenergie nimmt mit maximaler Entropieproduktion zu). Berechnungen mit Hypoplastizität können für extreme Belastungen realistische Lage- und Zustandsänderungen liefern. Relaxation, Wiederverdichtung und Lageänderungen danach durch viele kleine Wechsellasten könnte man mit Akkumulationsmodellen berechnen.

*Modellversuche mit Wasser* können Feldbedingungen näher kommen, sind allerdings schwieriger. Hydrostatische Verhältnisse ('Sand dräniert'), bei denen auf Sand und Festkörper nur Auftrieb wirkt, erfordern langsame Umlagerungen und/oder hohe Durchlässigkeit. Vernachlässigbar sind Relativbewegungen von Sand und Wasser ('undräniert') nur bei raschen Umlagerungen und/oder geringer Durchlässigkeit. Druckänderungen und Strömungen an freien Oberflächen von Sand und Festkörpern sind kaum prototyp-gemäß steuerbar. Man kann nicht alle Ähnlichkeitsgesetze zugleich einhalten, kann aber manche Wasserwirkungen verstärken und so verdeutlichen.

Die *Verflüssigung* von Sand wird in Wellenkanälen nicht feldtypisch erfasst, wenn sie im Nahfeld beweglicher Festkörper entsteht. Besser eignen sich Versuche mit einer Shakebox, deren in Lamellen gegliederte Querwände den von der Basis eingetragenen Erschütterungen folgen [6,10]. In ihr zerfällt ein lockeres Korngefüge bei kleinen Erschütterungen (vgl. Abb. 2), gibt Wasser durch sich bildende Kanäle ab und verdichtet sich. Korngefüge zerfallen durch große Erschütterungen, bei diesem Aufwühlen dringt Wasser durch temporäre Risse rasch ein. Bei weiterem Schütteln schwappt eine Suspension (Bild 5) hin und her (auch ein Attraktor), danach entsteht ein dichtes Korngefüge. Wandernde Wasserdruckwellen würden Sand ähnlich aufwühlen, anders als bei Erregung von unten gäbe es aber keine anschließende Verdichtung. Umlagerungen von Korngefügen und Drücken lassen sich bis zum Zerfall mittels Hypoplastizität erfassen, Kanalbildung und Suspensionsdynamik entziehen sich bislang der Berechnung.

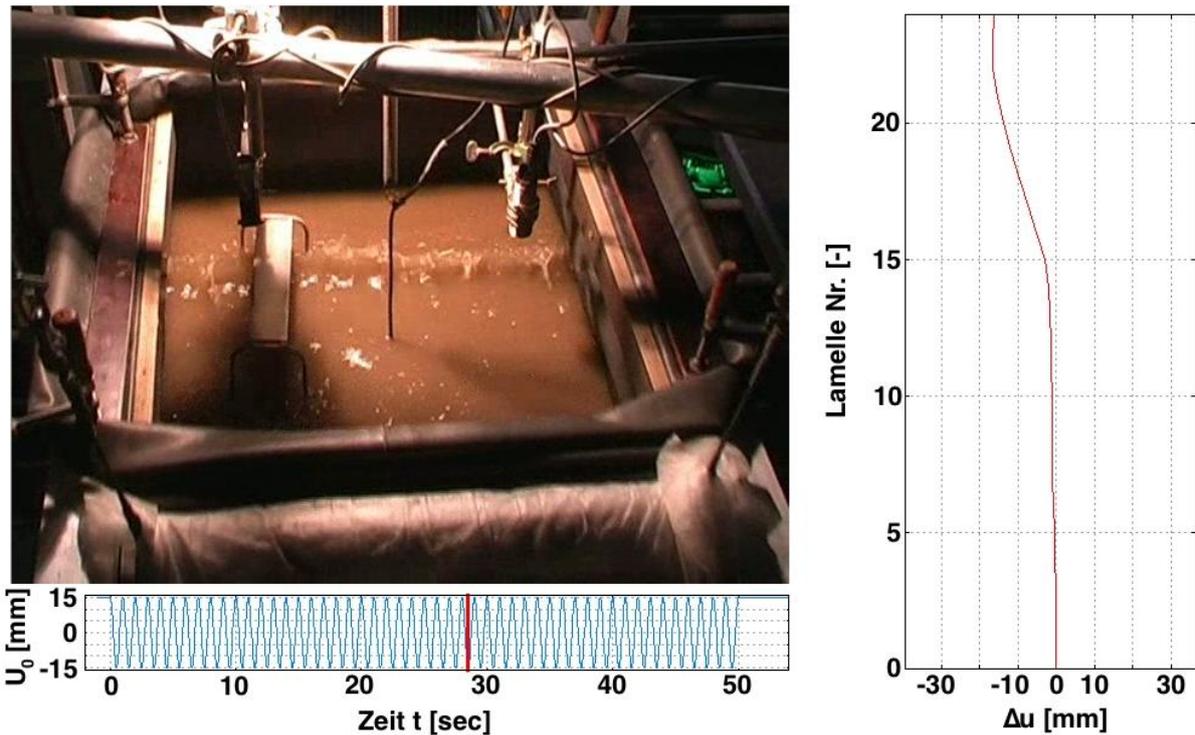


Bild 5: Shakebox-Versuch mit gesättigtem Sand [10]: Welle an der Oberfläche (links) und an der Wand (rechts) nach 28sec harmonischer Erregung (unten)

In unserer Shakebox wurden auch Pfahlgruppen untersucht, die in gesättigten Sand- und Tonschichten standen [11]. Bei zunehmenden Amplituden öffnete und schloss sich an jedem Pfahl ein tiefer werdender *Spalt*. Dort hielt sich der Boden zunächst durch Wasserunterdruck ( $p_w < p$ ), lockerte sich dann mit Rissbildung auf und kam als Suspension im Pilgerschritt hoch. Berechnungen mit Hypoplastizität gelangen bis zur Verflüssigung, das danach durch die Suspension mitbestimmte Systemverhalten ist bislang unberechenbar. Dies gilt auch für schwankende flacher einbindende Festkörper: An wiederholt klaffenden Stellen hält zunächst Wasserunterdruck das Korngefüge zusammen, dann verringert ein zunehmender Suspensionsbereich den Bodenwiderstand. Der Suspensionsausttrag im Pilgerschritt beeinträchtigt eine anschließende Selbstheilung.

### Prototypen

In situ ist die Bodendynamik schon *ohne Bauwerke* interessant. Sandablagerungen in der Deutschen Bucht sind überwiegend dicht, aber wenige Meter tief locker. Sie wurden nach der letzten Eiszeit und Stürmen hydraulisch verschleppt und waren nach diesem Suspensionsfließen zunächst locker. Sie werden am Meeresgrund durch Druckwellen infolge

von Meereswellen immer wieder mobilisiert. Der so erzeugte Porenüberdruck erlaubt bei Scherzyklen mit kleinen Amplituden eine Verdichtung ohne Gefügezerfall. Bei größeren Druckwellen durch Stürme wird der Sand dagegen je nach Seegang und Wassertiefe mehr oder weniger tief zu einer Suspension aufgewühlt. Dort verdichtet er sich nur wenig bis zum nächsten Sturm, während der früher darunter abgelagerte Sand sich gerade bei Sturm mit unten kleineren Scheramplituden verdichtet. Die temporäre Suspension fließt bei überströmtem oder geneigtem Meeresgrund zur Seite. Daher lagert sich dieser in Stürmen bei Strömung oder Neigung um, und ausgebagerte Kuhlen halten sich nicht lange.

*Böen und Wellen* werden für Berechnungen oft durch Tragwerkslasten ersetzt, das genügt aber nicht. Eine Freak Wave kann Sand weniger aufwühlen als Three Sisters, wenn durch diese in einem größeren Bereich Porenwasserunterdruck in Überdruck übergeht. Zur dynamischen Analyse bräuchte man Drücke und Frequenzen aus Wasserwellen nicht nur an Tragwerken, sondern auch an Sandoberflächen. Dies gilt sowohl für schädigende Stürme mit wenigen großen Wellen und Böen als auch für Selbstheilung und Sackung im Normalbetrieb.

Wissenschaftlich verwertbare Feldbeobachtungen liegen für *Flachgründungen* kaum vor, denn Überraschungen werden ungern offengelegt. Bei einem Großversuch an der Oosterschelde wurde ein Betonkasten auf Sand versehentlich zu weit verkantet, mit kleineren Wechsellasten drehte er sich danach unerwartet zurück. Dies ergab sich jüngst auch rechnerisch mittels Hypoplastizität [8]. Ein über 500m hoher Fernsehurm in Moskau wurde vor gut 40 Jahren nach bis heute geltenden geotechnischen Regeln mit einem Ring auf Sand gegründet. Wiederholt verkantete er sich im Orkan und richtete sich danach allmählich wieder auf, das wird bis heute geheim gehalten. Eine vor ca. 35 Jahren in der Nordsee mit einem regelgerecht dimensionierten Betonkörper auf dichten Sand gesetzte Förderplattform überstand den ersten Orkan mit unerwartet hohen Wellen und kenterte im zweiten. Mit über 10m eindringenden Stahlschürzen am Gründungsrand überstanden derart gegründete Plattformen Orkane, richteten sich nach unvermeidlicher Verkantung offenbar wiederholt auf und mussten erst wegen bis zu 9m Sackung nach ca. 20 Jahren aufgegeben werden.

Flache OWEA-Gründungen sollten so gestaltet sein, dass sie sich im Orkan nicht unannehmbar verkanten, sich danach wieder aufrichten und nicht zu tief einsacken. Dazu muss der Sand darunter nach der Platzierung dicht sein, das erfordert Baggermulden ohne Seegang und Einsenken mit Unterdruck und Erschütterung. Eine Nachverdichtung ist durch

Verpressen kaum erreichbar und nur im Innenbereich hohler Tragkörper entbehrlich. Der Gründungskörper sollte nur aussen und - auch nach unvermeidlicher Sackung - nicht innen aufsitzen, weil er sich sonst nicht nach Verkantung wieder aufrichten kann. Die Verflüssigung darf bei Orkanen nicht die Aufstandsfläche erreichen, weil sonst Suspensionsaustrag zum Kentern führen kann. Entwicklung und Erforschung sollte man unter diesen Aspekten fortsetzen.

Der DIN 1054-Nachweis mit begrenzt klaffender Fuge dient allenfalls zur Vorbemessung. Er sagt wenig über die Verkantung und Auflockerung bei Extrembelastung und die weitere Erweichung bei deren Wiederholung. Mittels Hypoplastizität kommt man der Realität bis zum - möglichst zu vermeidenden - Gefügezerfall näher, die anschließende Selbstheilung und Sackung kann man mit einem Akkumulationsmodell einschätzen. Der Großversuch von Züblin mit einem kreuzförmigen Fertigteil auf Sand mit Kleibändern bei Cuxhaven wird Daten zur Ertüchtigung von Rechenmodellen liefern. Zu begrüßen wäre auch ein Großversuch mit dem von Hochtief vorgeschlagenen Fundament aus Konus und Ring. Das Verhalten in der Deutschen Bucht kann allerdings wegen der Suspensionsdynamik bei Orkanen ungünstiger sein, das können Großversuche kaum erhellen.

Auch zu *Tiefgründungen* offshore wird seltener über Misserfolge als über Erfolge berichtet. *Einzelpfähle* haben sich als OWEA-Gründung in Sand bewährt für Wassertiefen bis etwa 12m. Dann sind Monsterwellen niedriger als weiter weg von der Küste, so dass handhabbare Pfahlgrößen und erreichbare Rammtiefen fixe Pfahlfüße und volle Wiederaufrichtung ermöglichen. In der tieferen Deutschen Bucht wären Durchmesser und Rammtiefen erforderlich, die man bislang nicht realisieren kann. Größere Tiefen als mit Kopframmung ließen sich dadurch erreichen, dass die zur Verminderung des Eindringwiderstandes erforderliche Seismik näher am Pfahlfuß erzeugt wird. Modellversuche und Berechnungen werden zur Klärung nicht genügen, und in Feldversuchen kann man - wie auch für andere Gründungen - extreme hydraulische Einwirkungen kaum erfassen.

Kurze biegesteife *Tripoden* sind für die Deutsche Bucht unvorteilhaft. Sie geben zwar in dichtem Sand bei einer einzelnen großen Welle wenig nach, weil sich die Körner durch Dilatanzbehinderung fast im gesamten Nahfeld verspannen. Bei rasch einander folgenden großen Wellen wird aber das Korngefüge zunehmend an den Pfählen aufgelockert und mit Porenüberdruck entspannt bis zum Zerfall. Dadurch kommt der Tripod sich drehend hoch und kann durch einige große Wellen kentern. Der Normalbetrieb führt zwar zur

Wiederverdichtung, aber (wie weiter oben begründet) nicht zur Wiederaufrichtung. Berechnungen wären aufwändig, Feldbeobachtungen im Normalbetrieb und bei mäßigen Stürmen sagen nicht genug über das Verhalten bei und nach Orkanen.

*Jacket*-Gründungen mit flexibleren und tieferen Pfählen schneiden besser ab. Eine Extremwelle bewirkt zwar eine - bei dichtem Sand kleine - horizontale Kopfverschiebung, aber wegen engerer und längerer Scherzonen an den Pfählen weniger Verkantung durch Hebung in Luv und Eindringung in Lee. Mit einigen großen Wellen ohne Pausen entwickelt sich die Aufweichung langsamer als bei kurzen Tripoden nach unten, weil dort die Verformungen kleiner bleiben und das Porenwasser im engeren Nahfeld rascher diffundiert. Damit verkantet und hebt sich die Gründung bei Stürmen langsamer - aber unabwendbar, wie Insider wissen. Im Normalbetrieb dreht sie sich nicht wieder zurück und sackt kaum ein, entspannt sich allerdings und verdichtet benachbarten Boden wieder. Wie oben begründet sollte man nach konventioneller Vorbemessung Szenarios mit Hypoplastizität und Akkumulationsmodell generieren. Dies gelingt bis zum Gefügezerfall, Suspensionswirkungen danach sollte man vermeiden.

*Verankerungen* verhalten sich grundsätzlich ebenso, vorliegende Feldberichte ermöglichen aber keine ausreichende Quantifizierung. Ein Ankerkörper verspannt sich in dichtem Sand durch schräges Ziehen, solange sich der Boden daneben nicht zu sehr aufweitet, und entspannt sich jenseits davon. Unter pulsierender Last entspannt sich der Boden, und der Anker kommt schon bei kleiner mittlerer Kraft in größer werdenden Schritten heraus [9]. Nach Anspannen und Fixieren der mittleren Position des Zugglieds entspannt sich dieses durch axiale Verschiebungszyklen. Wegen der korngößenabhängigen Scherlokalisierung kann man solche Vorgänge bislang nur mit Anpassung an Großversuche zutreffend vorausberechnen. Die Suspensionsdynamik kommt erschwerend hinzu.

Die Wirkung von Verankerungen für eine der vorher behandelten OWEA- Gründungen ist kaum allgemein oder gar einfach einschätzbar. Sicher vermindern sie die Verkantung und Hebung durch extreme Wellen, eine Selbstaufriechung ist aber allenfalls mit aussergewöhnlich tiefen Ankerkörpern und dehnbaren Zuggliedern erreichbar. Mit einer nachträglichen Verankerung könnte eine im Orkan verkantete Gründung aufgerichtet werden, wegen asymmetrischer Wiederverdichtung wären allerdings Nachstellungen notwendig. Letzteres gilt auch für verankerte OWEA-Schwimmkörper.

Auf Besonderheiten *feinkörniger Böden* sei kurz hingewiesen. Konsolidierte dünne Kleibänder werden im Sand der Deutschen Buch oft angetroffen. Sie vermindern vor allem die vertikale Durchlässigkeit und ermöglichen damit größere Abweichungen von hydrostatischen Porenwasserdrücken. Bei Platzierung und Betrieb können sie daher durch Seegang verflüssigte Bereiche vergrößern. Durchgehend feinkörnige marine Böden sind ohne Konsolidierung weich und strukturempfindlich dadurch, dass van der Waals-Kräfte und Gasblasen Makroporen ermöglichen [1]. Dann können Stöße zu Schlammlawinen führen, und große Wellen können den Boden so tief stellenweise verflüssigen, dass er gemeinsam mit Gründungen abdriftet [12]. Mit weichen Bodenpartikeln kommen Kriechen und Relaxation durch thermische Aktivierung ins Spiel. Ein Feldversuch mit gegeneinander alternierend verbogenen Pfählen im Sandwichboden der San Francisco Bay konnte mittels Visko Hypoplastizität reproduziert werden [1,11]. Solange durch glaziale Vorbelastung konsolidierter Ton nicht durch starke Wechselbeanspruchung aufgewühlt wird, ist er auch offshore ein guter Baugrund.

Auf den *Kolkschutz* sei kurz hingewiesen. Er soll das Suspensionsfließen nicht nur im benachbarten Freifeld verhindern, sondern auch im Nahfeld schwankender Tragkörper. Eine schwere, poröse und beweglich angeschlossene Matte verhindert den Gefügezerfall und folgt unvermeidlichen Bewegungen ohne sich zu öffnen. Ihr Aussenrand sollte weniger schwer und verankert sein, um nicht zu versinken und zu verrutschen. Da dies bis heute nicht durchweg erreicht wird, sind Reparaturen sowie weitere Forschung und Entwicklung erforderlich. Man wird insoweit eine Schädigung wohl nie ganz vermeiden und eine komplette Selbstheilung kaum erreichen können.

*Konventionelle Methoden* zum Gründungsentwurf sind physikalisch derart 'auf Sand gebaut', dass sich diese Metapher mit ihnen bei OWEA- Gründungen verwirklichen kann. Die Anwendung der DIN 1054 ist in derselben für solche Fälle ausgenommen, man sollte dann überhaupt das übliche Schema von Vorschriften beiseite lassen. 'Is Limit State Design is a Judgment Killer?' wird aufgrund der Erfahrung mit anelastischen bodendynamischen Effekten gefragt [13]. Die Begriffe ULS und SLS implizieren die Schranken- und Shakedowntheoreme der Plastizitätstheorie, die gelten aber nicht für Sand. Das folgende Fazit soll als Denkhilfe und nicht als Vorschrift dienen.

## **Fazit**

*Naturgegebenheiten* sollte man ausreichend verstehen. Dazu gehören energetisch

bevorzugte Attraktoren (monoton, zyklisch oder seltsam) von Korngefügen und Suspensionen. Aufbau und Dichteverteilung des Meeresgrundes darf man in Hinblick auf Entstehung und OWEA-Nutzung nicht zu sehr vereinfachen. Seegang kann Meeresboden verdichten, wühlt ihn aber oberflächennah wieder auf. Der Grund wird daher vor allem in Orkanen mit Monsterwellen umgestaltet. Neben Tragwerkslasten aus Wind und Wellen verändern wandernde Druckwellen und Strömungskräfte am Grund die Gründung und den Kolkschutz.

*Schädigungen* werden durch Lage- und Zustandstoleranzen definiert. Erlaubte Verkantung und Sackung des Tragwerks ergeben sich aus dem Betrieb, hinnehmbare Auflockerung und Verschleppung des Bodens aus möglichst realistischen Szenarios. Empirische Sohl- und Seitendruckansätze ermöglichen eine Vorbemessung, erfassen aber Lage- und Zustandsänderungen kaum. Diese ergeben sich mittels Hypoplastizität ziemlich realistisch bis zum - im Tragbereich der Gründung tunlichst zu vermeidenden - Zerfall des Korngefüges. Insoweit ist Stabilität impliziert, denn dafür sind bei Einhaltung von Lagetoleranzen notwendige Bedingungen erfüllt. Das Entstehen und Fließen einer Suspension kann man bislang nicht berechnen, auch nicht hydraulisch granulare Kettenreaktionen beim Kollaps.

Die *Selbstheilung* genannte Wiederverdichtung, -aufrichtung und -entspannung im Normalbetrieb nach einer Orkanbeanspruchung soll das Tragsystem rechtzeitig vor einer weiteren ertüchtigen. Nicht reitende Flachgründungen und flexible Tiefgründungen können sich bei genügender Breite und Tiefe und genügendem Kolkschutz im Normalbetrieb weitgehend regenerieren. Bestimmend ist die seismisch induzierte Entropieproduktion, dies wird durch bisher verwendete Akkumulationsmodelle noch nicht ganz erfasst. Modellversuche nützen zur Validierung von Rechenverfahren, lassen sich aber nicht einfach hochskalieren, weil nicht alle Modellgesetze zugleich erfüllbar sind. Feldbeobachtungen sagen nicht genug über das Verhalten bei und nach Monsterwellen, solange diese nicht auftreten.

Schädigung und Selbstheilung bei OWEA-Gründungen werden mit konventionellen Methoden nicht erfasst, Feldbeobachtungen reichen nicht für rein empirische Regeln. Mit Mechanismen der Umlagerung und Druckumverteilung von und mit Sand im Zusammenwirken mit Wasser und Festkörpern kommt man weiter. Man kann solche Vorgänge bis heute nur teilweise vorausberechnen und wird dies nie ganz können, kommt aber mit physikalischem Verständnis trotzdem auch offshore besser voran.

- [1] G. Gudehus: *PHYSICAL SOIL MECHANICS*; Springer, Berlin etc. 2010
- [2] G. Gudehus, Y. Jiang, M. Liu: Seismo- and thermodynamics of granular solids; *Granular Matter*, 2010 (im Druck)
- [3] T. Wichtmann, A. Niemunis, Th. Triantafyllidis: Recent improvements of a high-cycle accumulation model for sand, Workshop "Gründung von Offshore-Windenergieanlagen", Karlsruhe, 2010, *Veröff. Inst. Boden- und Felsmech.* Karlsruher Institut für Technologie, Heft 172, S. 35-47
- [4] T. Wichtmann, A. Niemunis, Th. Triantafyllidis (2010): On the determination of a set of material constants for a high-cycle accumulation model for non-cohesive soils; *International Journal for Analytical and Numerical Methods in Geomechanics*, Vol. 34, Nr. 4, S. 409-440.
- [5] G. Gudehus: Psammodynamics - Attractors and Energetics; *9th HSTAM Cong. Mechan.*, Limassol Cyprus, online 2010
- [6] H. Wienbroer: Umlagerungen von Sand bei Wechselbeanspruchung; *Veröff. Inst. Boden- und Felsmech.*, Karlsruher Institut für Technologie, 2010 (in Vorbereitung)
- [7] H. Sturm: Stabilization behavior of cyclically loaded shallow foundations for offshore wind turbines; *universitätsverlag karlsruhe*, online 2009
- [8] O. Solf: Untersuchungen zum mechanischen Verhalten von zyklisch belasteten Offshore-Gründungen; *Veröff. Inst. Boden- und Felsmech.*, Karlsruher Institut für Technologie, 2010 (in Vorbereitung)
- [9] D. Rebstock: Ver- und Entspannung von Sand an Festkörpern; *Veröff. Inst. Boden- und Felsmech.*, Karlsruher Inst. f. Technol., 2010 (in Vorbereitung)
- [10] Wienbroer, H., Rebstock, D., Huber, G. (2008): Shake-Box: Versuche und Nachrechnungen In: Geomechanik Kolloquium Karlsruhe "Grundlagen und Anwendungen der Geomechanik", *Veröff. Inst. Boden- und Felsmech.*, Universität Fridericiana in Karlsruhe, Band 170b, Teil 2, S. 195-216.
- [11] M. Bühler: Experimental and numerical investigation of soil-foundationstructure interaction during monotonic, alternating and dynamic loading; *Veröff. Inst. Boden- u. Felsmech.*, Heft 166, Uni Karlsruhe, 2006
- [12] GH Sterling, EE Strohbeck: The failure of the South Pass 70 "B"platform in hurricane Camille; *Offshore Technol. Conf.* Dallas/Texas, Paper Nr. OTC 1898, 1973
- [13] Mortensen, K., (1983): Is Limit State Design a Judgment Killer?, Bulletin 35, *Danish. Geotechnical Institute*, Copenhagen.