

Diplomarbeit – Kurzfassung

Irreguläre zyklische Belastungsversuche
mit Sand im Triaxialgerät

Peter Geißler

Bauwerke jeglicher Art und der sie umgebende Boden sind vielfältigen Belastungen ausgesetzt. Teilweise sind diese sehr komplex und zyklisch unregelmäßig. Insbesondere Brücken und die Tragwerke von Windenergieanlagen werden maßgeblich von dynamischen irregulären Lasten beansprucht. Aktuell werden große Anstrengungen unternommen, um fundierte Nachweisverfahren für Gründungen in diesen Gebieten zu entwickeln, vor allem für Offshore-Windenergieanlagen. Durch den Beschluss des deutschen Bundestags vom Juni 2011 den geplanten Atomausstieg zu beschleunigen und den Fokus verstärkt auf erneuerbare Energien zu richten, hierbei in erster Linie auf die Windenergie, hat die Forschung in diesem Bereich noch einmal an Bedeutung gewonnen.

Offshore-Windenergieanlagen werden hauptsächlich von Wind, Wellen und Meeresströmungen beansprucht, welche sehr unregelmäßig und je nach Wetterlage in verschiedenen Intensitäten auftreten. Für die Dimensionierung einer Konstruktion sind meist Modellberechnungen erforderlich, die auf quasi-statischen bzw. regelmäßigen zyklischen Belastungen beruhen. Mit Hilfe von stochastischen Methoden bzw. von Zähl- und Klassierverfahren (z.B. zweiparametrische Rainflow-Methode) kann man aus der unregelmäßigen Belastungsgeschichte in situ auf regelmäßige Lastkollektive (Zykluspakete mit konstanter Amplitude) schließen (siehe Bild 3). Jedoch geht dabei die zeitliche Reihenfolge der Belastung komplett verloren. Demnach ist die Grundlage für diese Vorgehensweise, dass die Anordnung der regelmäßigen Zykluspakete den Endwert der bleibenden Verformung des Bodens nicht beeinflusst, das heißt die PALMGREN-MINER-Regel gültig ist.

In der Diplomarbeit wird überprüft, ob diese lineare Schadensakkumulationstheorie, welche ursprünglich für metallische Werkstoffe entwickelt wurde, ebenfalls für einen marinen Fein- bis Mittelsand Gültigkeit besitzt. Dafür wurde mit diesem nichtbindigen Boden eine Versuchsreihe an einem zyklischen Triaxialgerät durchgeführt.

Nach der Erläuterung der theoretischen Hintergründe wird im Hauptteil dieser Arbeit das verwendete Triaxialgerät (siehe Bild 1) detailliert beschrieben. Dazu gehören die Funktionsweise und die Kalibrierung der einzelnen Komponenten des Geräts.

Des Weiteren wird der Einbau einer aufbereiteten Probe und die Versuchsdurchführung erläutert. Der verwendete Mischsand stammt aus dem überwiegend sandigen Untergrund der Nordsee, dessen heutige Struktur des Bodens durch eine Sedimentation der Sande entstanden ist. Folglich wurden die Proben durch Einrieseln hergestellt, um die Verhältnisse in situ (z.B. Kornstruktur, Spannungsverhältnisse bei der Konsolidierung) optimal abbilden zu können.

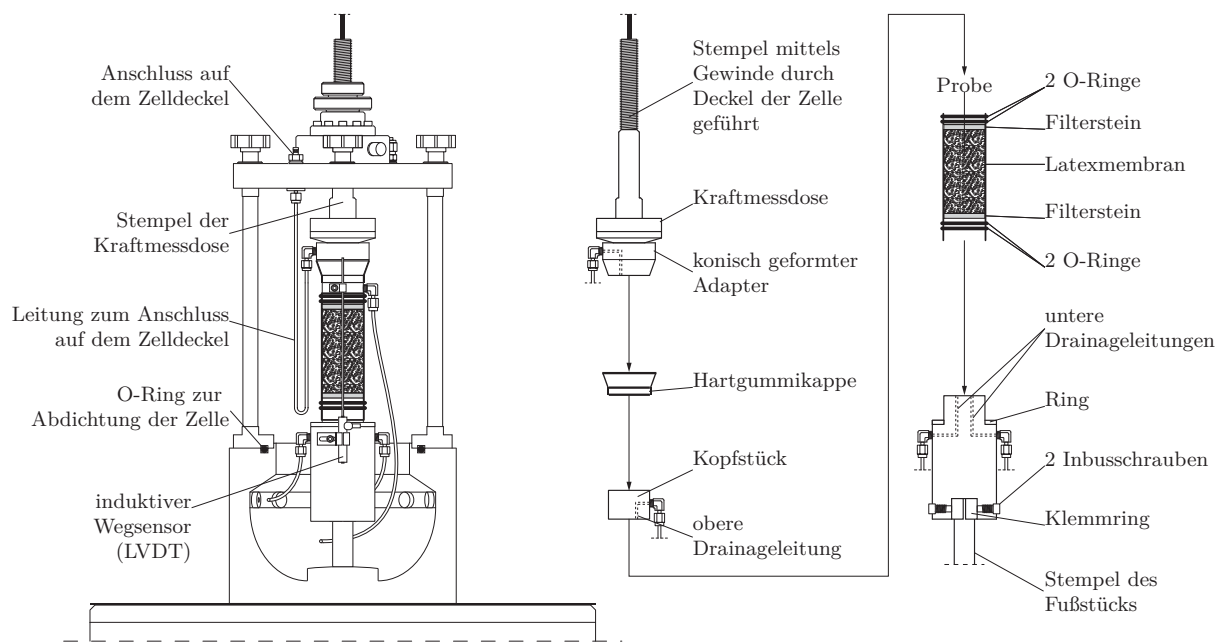


Bild 1: Aufbau des zyklischen Triaxialgeräts – Innenansicht und Details

Die durchgeführte Versuchsreihe setzt sich aus zahlreichen Mehrstufen- und Einstufenversuchen zusammen, die alle unter drainierten Bedingungen durchgeführt wurden. Anhand der Mehrstufenversuche wurde nachgewiesen, dass die Reihenfolge bestimmter Zyklenpakete mit unterschiedlicher vertikaler Spannungsamplitude $\Delta\sigma_1$ lediglich einen geringen Einfluss auf das Verformungsergebnis hat und damit die PALMGREN-MINER-Regel gültig ist. Dies gilt sowohl für Zyklenpakete mit gleichem mittlerem Spannungszustand (p'_{av}, q_{av}) als auch für Zyklenpakete mit unterschiedlichen mittleren Spannungszuständen (siehe Bild 2).

Aus den Werkstoffwissenschaften ist bekannt, dass der mittlere Spannungszustand einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die Dauerfestigkeit hat. In Bezug auf den verwendeten Mischsand zeigt die Auswertung der Einstufenversuche eine ähnliche Bedeutsamkeit des mittleren Spannungszustands. Jedoch machen die Ergebnisse deutlich, dass sowohl die Akkumulationsrate der Dehnungen als auch das Verformungsergebnis entscheidend von der Kombination aus mittlerem Spannungszustand und vertikaler Spannungsamplitude abhängt.

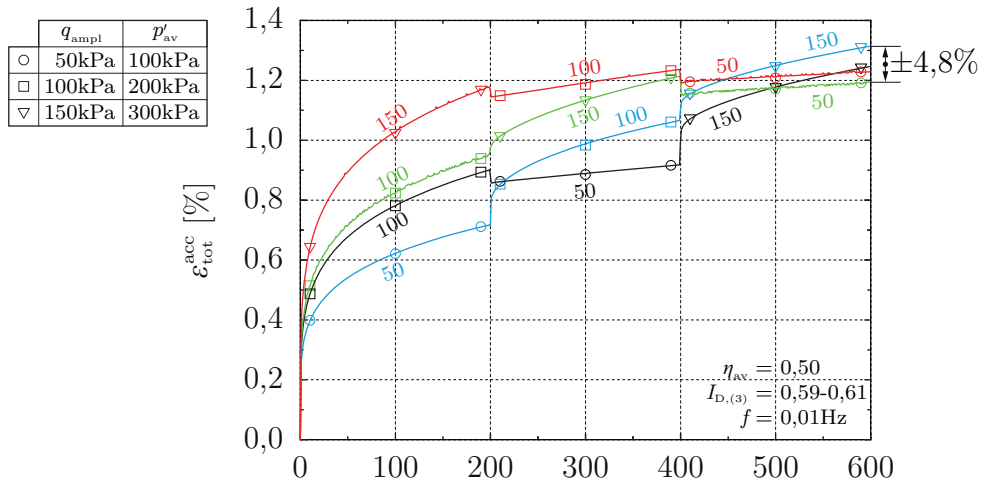
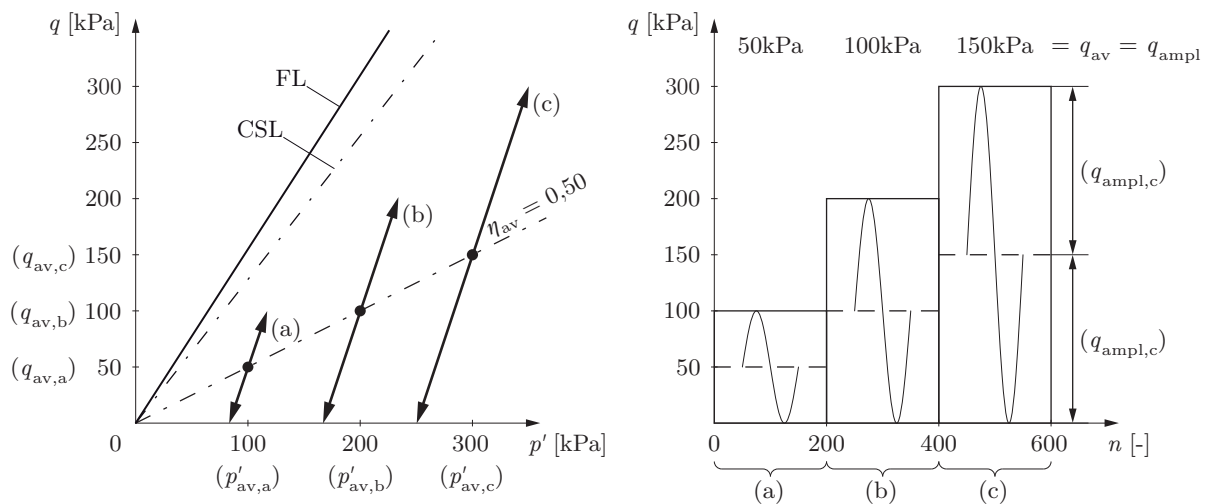


Bild 2: Akkumulation der totalen Dehnung für zyklische Triaxialversuche mit drei Zyklenpaketen á 200 Zyklen mit unterschiedlichen mittleren Spannungszuständen (oben: Versuchsdurchführung, unten: Versuchsergebnisse)

Auf der Grundlage der Ergebnisse dieser Diplomarbeit können weitere Untersuchungen aufbauen. Ziel sollte es sein, Annahmen zu finden, wodurch ein irregulärer und ein regulärer Belastungsverlauf, der aus einem Zyklenpaket besteht, annähernd äquivalente Verformungsergebnisse verursachen.

In Bild 3 ist ein möglicher Leitfaden für die weitere Vorgehensweise dargestellt. Durch eine Klassierung wird die irreguläre Belastung in übersichtliche, in sich reguläre Lastpakete unterteilt. Nach der Bereinigung des Mittelspannungseinflusses wird ein Lastpaket mit einer definierten Amplitude und einer schadensäquivalenten Zyklenzahl gesucht. Am

Ende sollten alle in Bild 3 gezeigten Belastungen trotz unterschiedlicher Kennwerte die selbe Verformung hervorrufen.

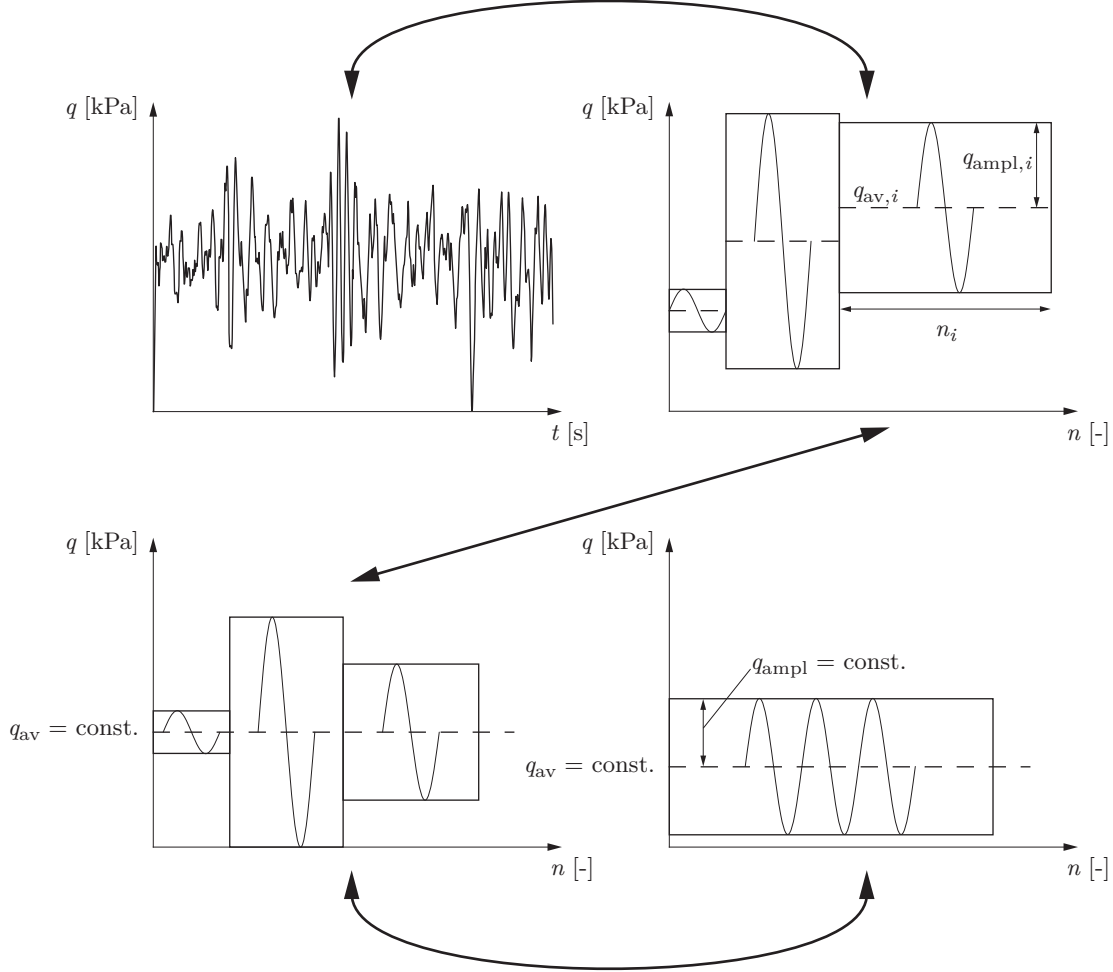


Bild 3: Umwandlung einer irregulären in eine reguläre Belastungsfunktion