

Weshalb werden aufwändige zyklische und bodendynamische Laborversuche bei der Gründung von Offshore Windenergieanlagen benötigt?

Prof. Dr.-Ing. Frank Rackwitz

Prof. Dr.-Ing. Stavros Savidis

Dipl.-Ing. Ralf Glasenapp

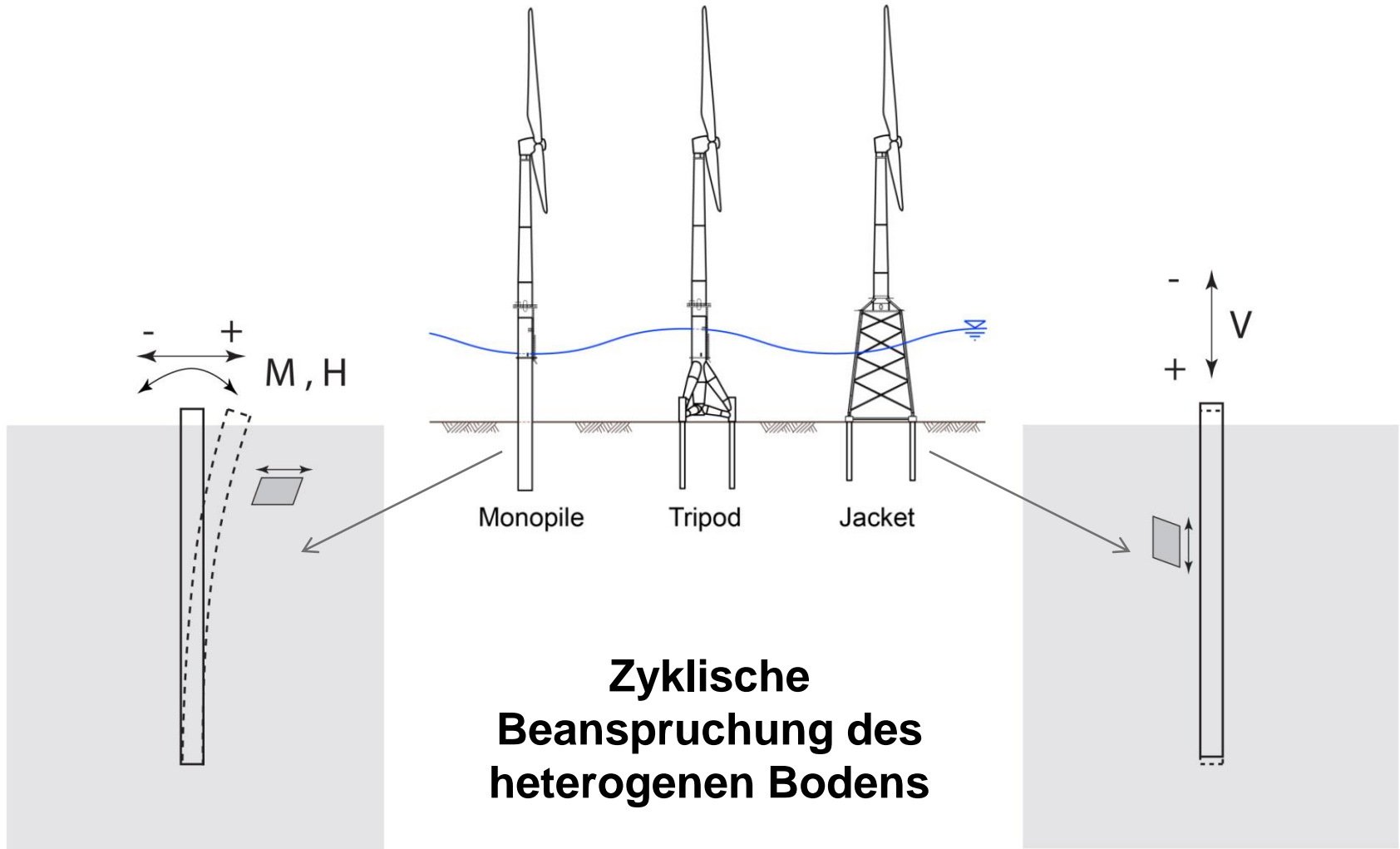
Dr.-Ing. Viet Hung Le

Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, TU Berlin

- **Einleitung**
- **Bodenverhalten und geotechnische Untersuchungsmethoden**
- **Irreguläre zyklische Einwirkungen**
- **Multidirektionale zyklische Einwirkungen**
- **Zusammenfassung und Schlussfolgerungen**

- **Einleitung**
- Bodenverhalten und geotechnische Untersuchungsmethoden
- Irreguläre zyklische Einwirkungen
- Multidirektionale zyklische Einwirkungen
- Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Einwirkungen und Boden-Bauwerk Interaktion bei OWEA Pfahlgründungen

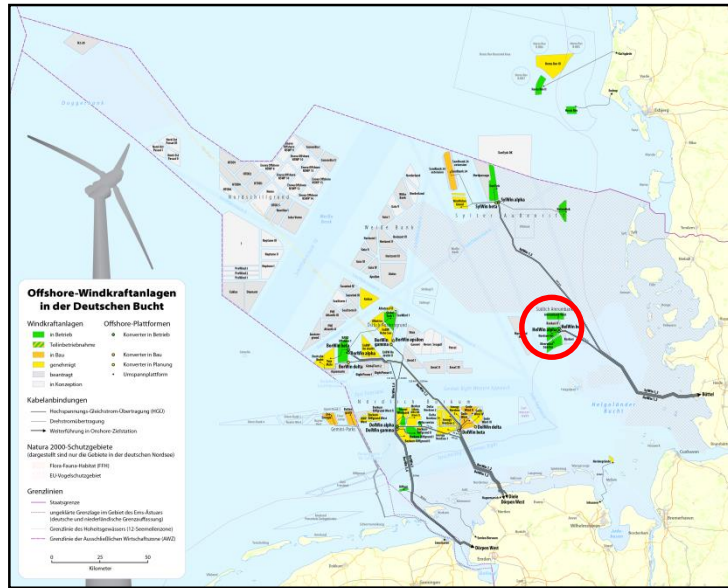


Böden

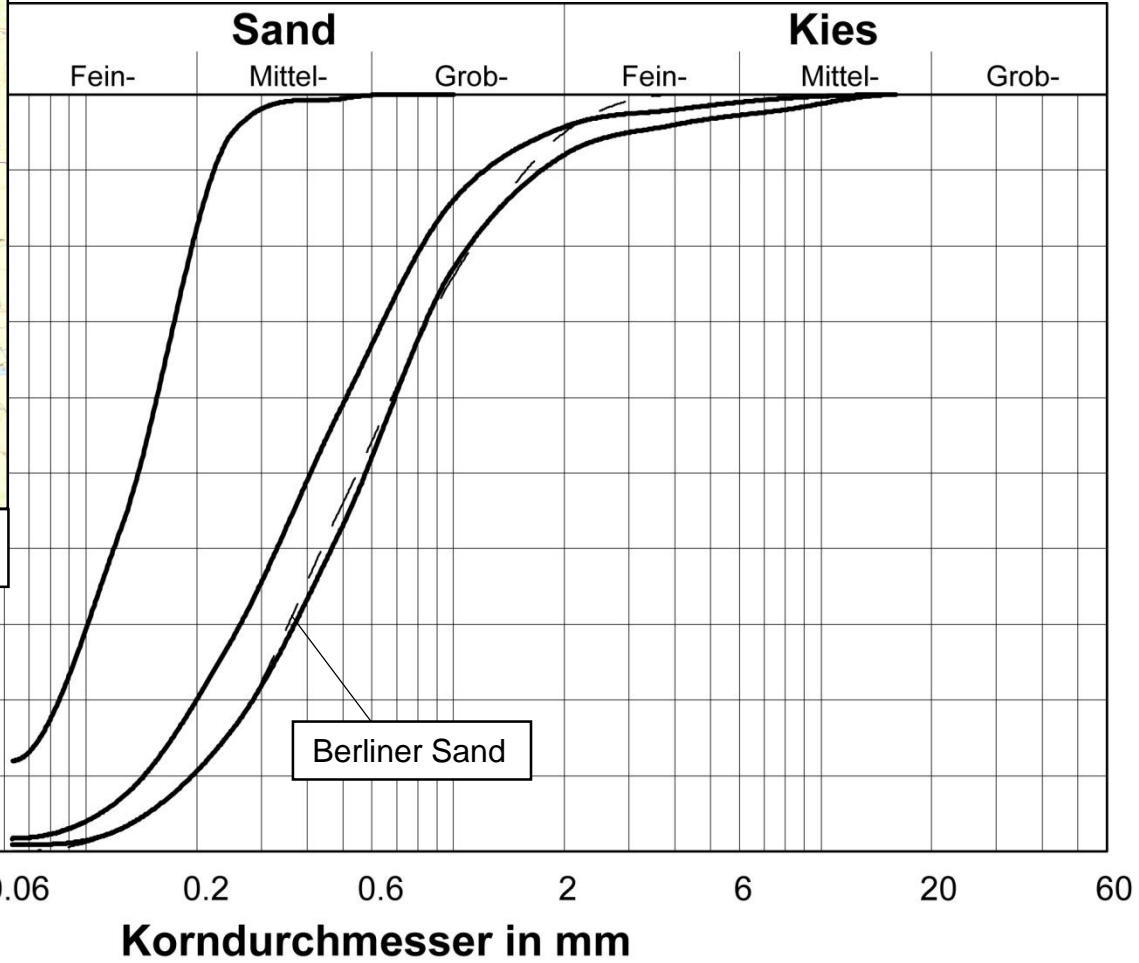
- **Natürliche, heterogene, geschichtete, vielfältige Materialien (Sande, Tone ...)**
- **Stichprobenanalyse** eines heterogenen Materials mittels geotechnischer Erkundungen (In situ direkt/indirekt, Labor)
→ Geotechnischer Bericht
- **Kosten** der Materialuntersuchungen vom Bauherrn „zusätzlich“ einzuplanen
- **Beobachtungsmethode** bei Ausführung und Betrieb

Stahl

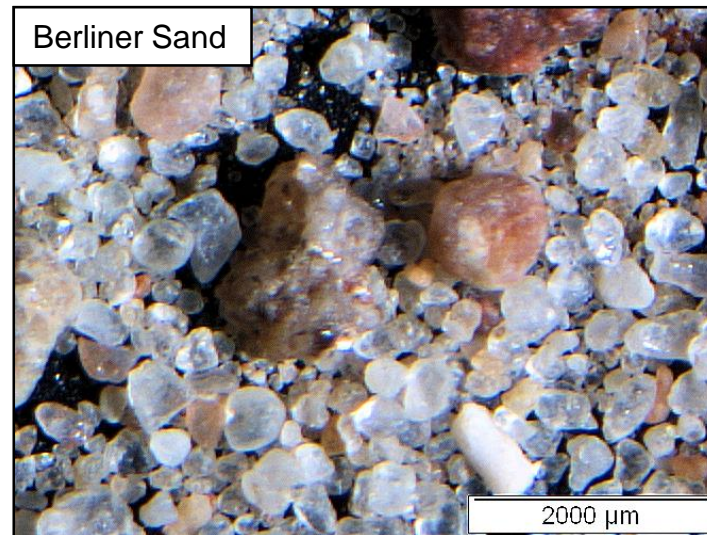
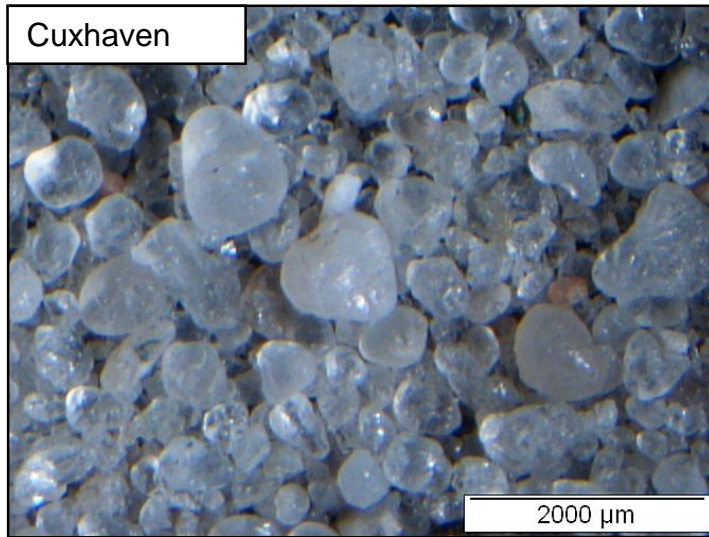
- **Technisches, homogenes, genormtes Material**
- QS und laufende Überwachung der Materials mit **statistischer** Auswertung, Hersteller gewährleistet **Materialqualität** nach DIN/EN
- **Kosten** der Materialuntersuchungen sind in den Materiallieferkosten enthalten
- **Structural Health Monitoring** im Betrieb



Nordsee Ost



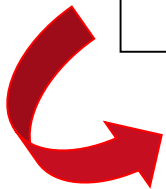
Mittelsande - Kornform



- Einleitung
- **Bodenverhalten und geotechnische Untersuchungsmethoden**
- Irreguläre zyklische Einwirkungen
- Multidirektionale zyklische Einwirkungen
- Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Einige Besonderheiten des Materials „Boden“

- **Mehrphasensystem (Feststoff, Wasser, Luft)**
- **Sättigungsgrad ($S_r = 0 \dots 1$)**
- **Bindige (z.B. Ton) vs. nichtbindige (z.B. Sand) Böden**
- **Einfluss der Partikel und des Materialzustands (z.B. Dichte)**
- **Dränirtes vs. undränirtes Verhalten**
- **Belastungsabhängiges, nichtlineares Materialverhalten**



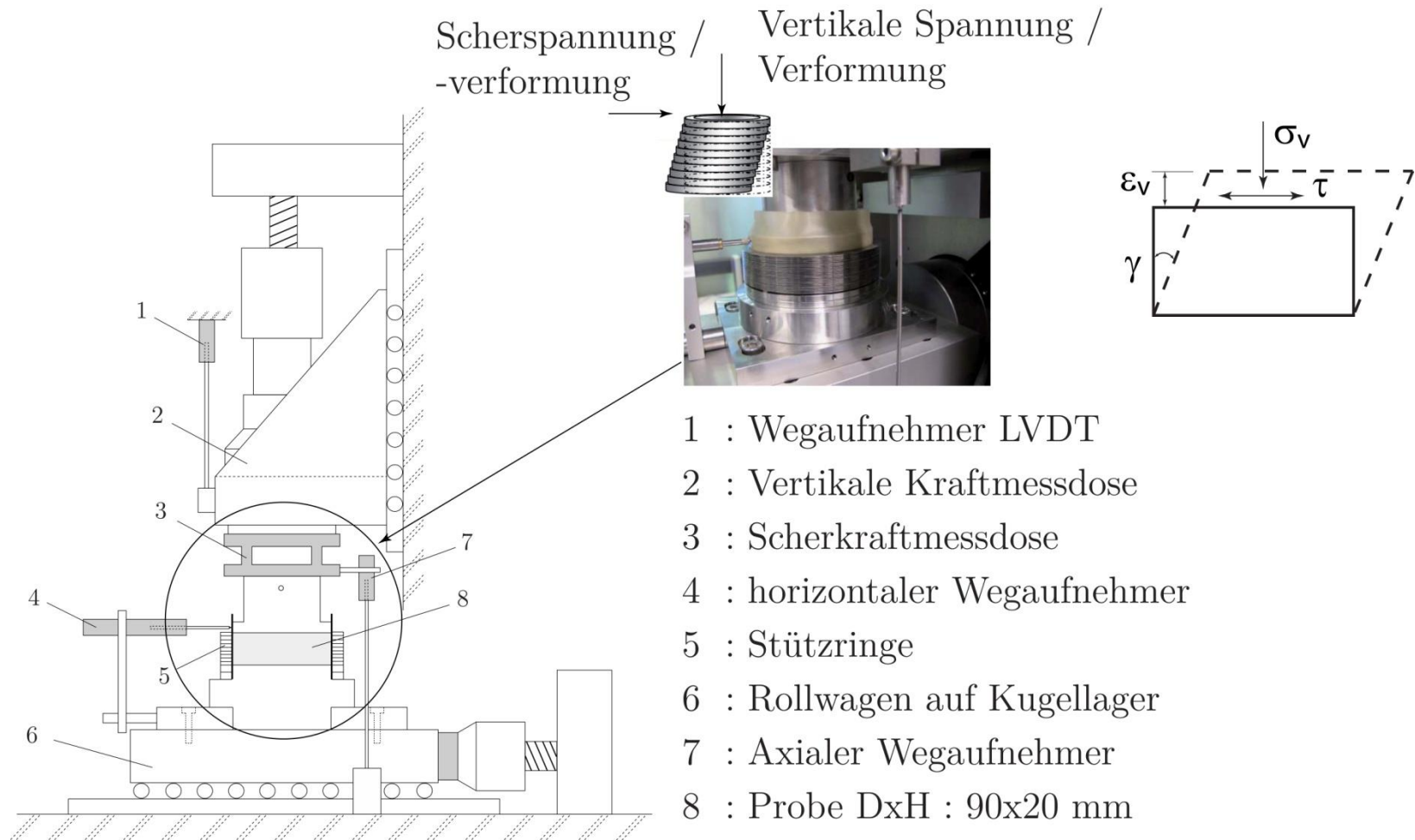
Böden sind sehr komplexe Materialien!

Laboruntersuchungsmethoden bei zyklischer Beanspruchung

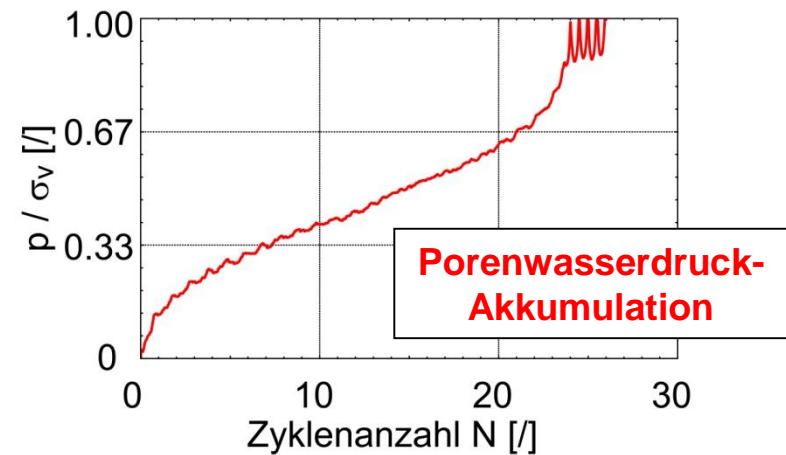
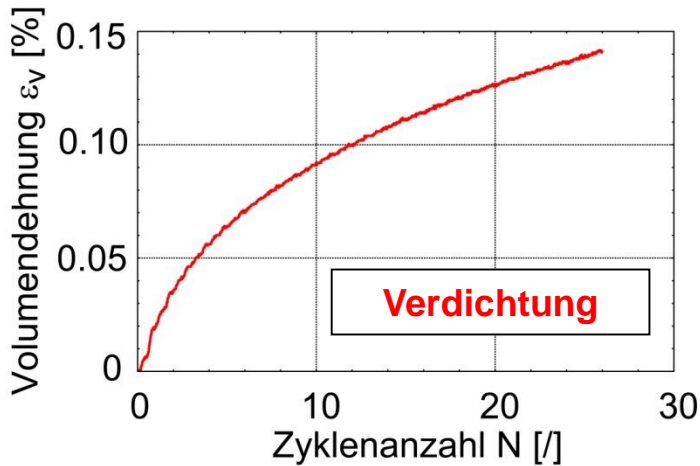
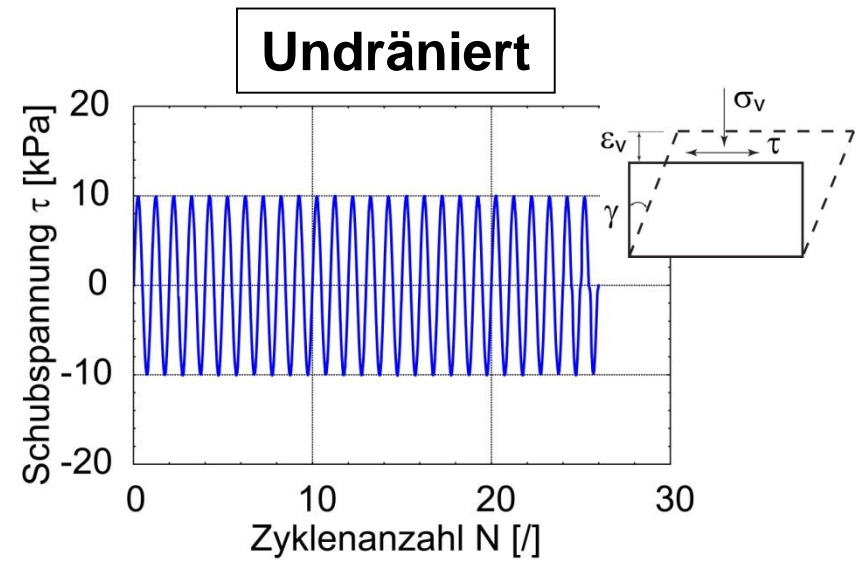
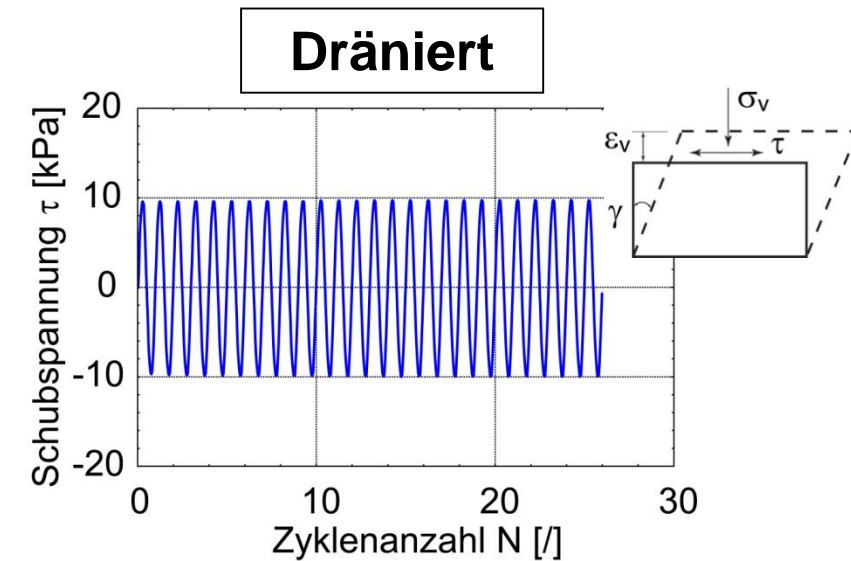
Eignung der Versuche: ++ sehr gut + gut o bedingt – ungeeignet	Untersuchungsgegenstand					
Untersuchungsmethode	Porenwasserdruck- entwicklung	Ver-/Entfestigung	Volumenänderung	kleine Verzerrungen	Materialdämpfung	Wellengeschwin- digkeiten
<i>Laboruntersuchungen</i>						
Zyklischer Triaxialversuch (undränert)	++	+	–	o	o	–
Zyklischer Triaxialversuch (dränert)	–	+	++	o	o	–
Zyklischer Einfach-Scherversuch (volumenkonstant)	++	+	–	o	o	–
Zyklischer Einfach-Scherversuch (dränert)	–	+	++	o	o	–
Zyklischer Rahmen-Scherversuch (dränert)	–	+	+	o	o	–
Zyklischer Rahmen-Scherversuch (dränert) unter CNS (constant normal stiffness) Bedingungen	–	+	+	o	–	–

Auszug aus: Tabelle 13.1, EA Pfähle, 2.Aufl., DGGT (Hrsg.), E&S Verlag, 2012

Bodenmechanische und bodendynamische Laborversuche bei der Gründung von OWEA | Rackwitz, Savidis, Glasenapp, Le

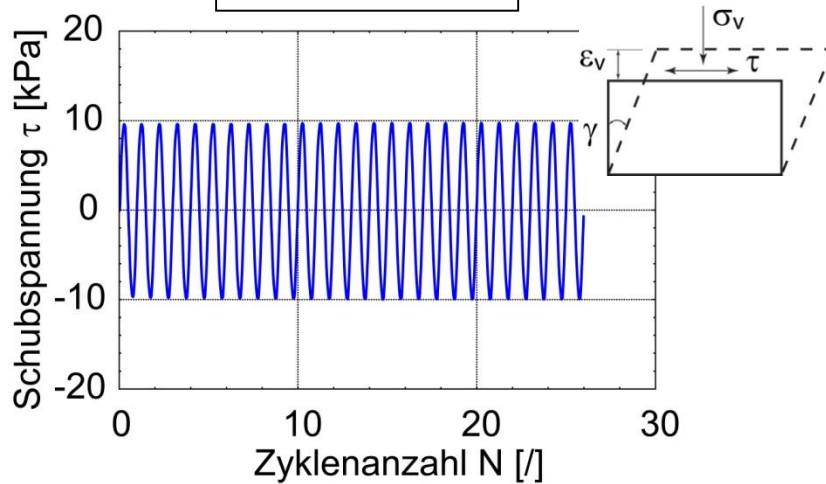


Zyklischer Einfachscherversuch mit Sand

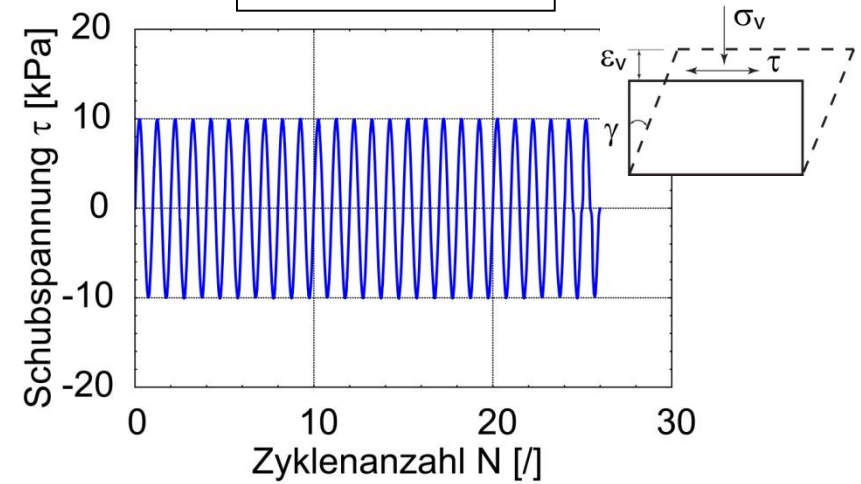


Zyklischer Einfachscherversuch mit Sand

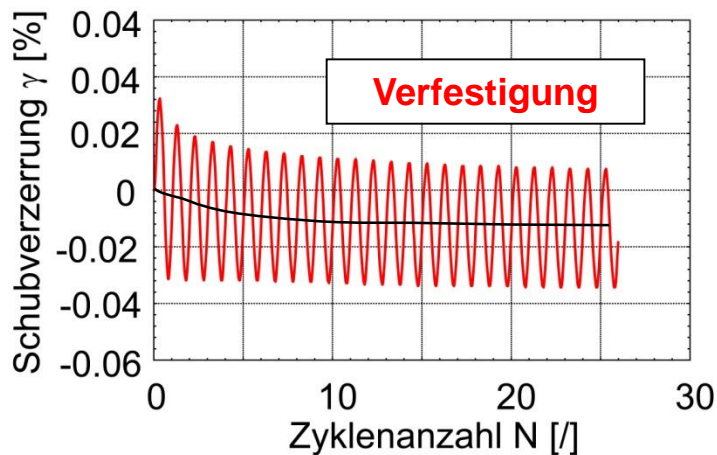
Dräniert



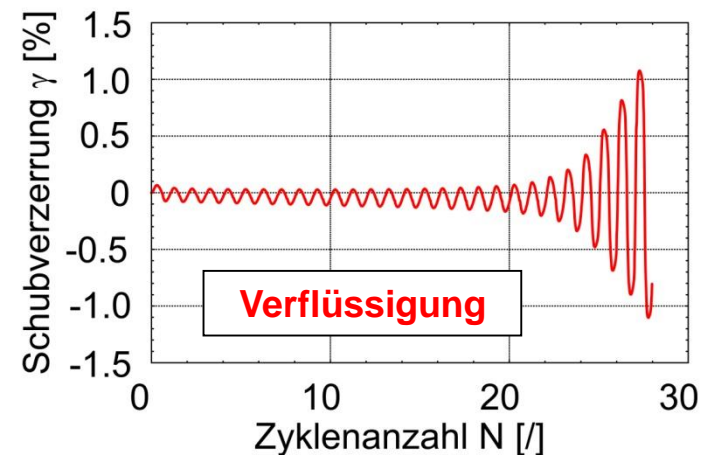
Undräniert



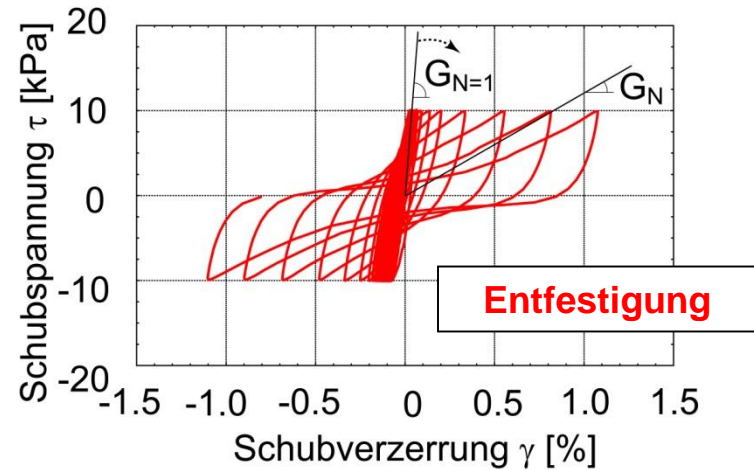
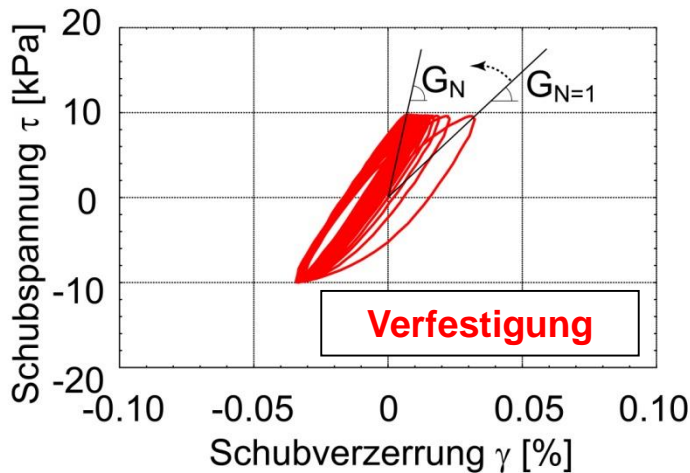
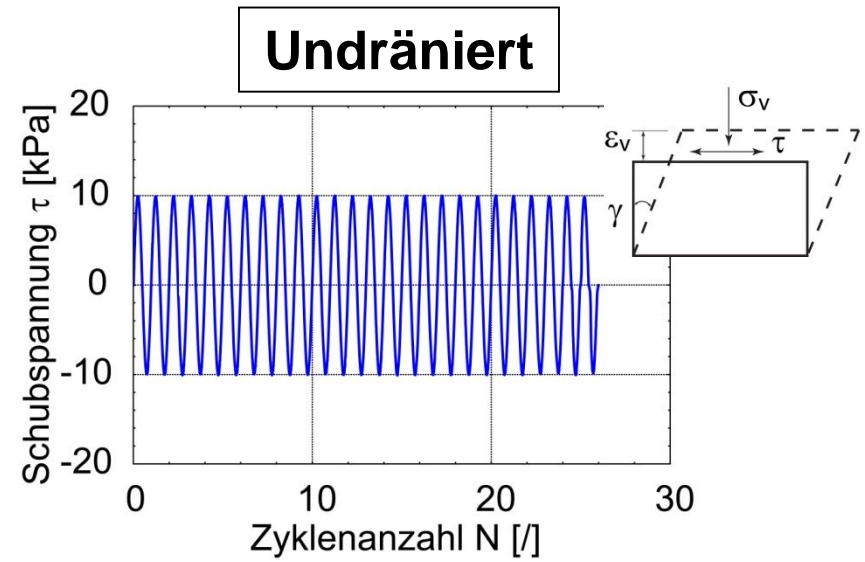
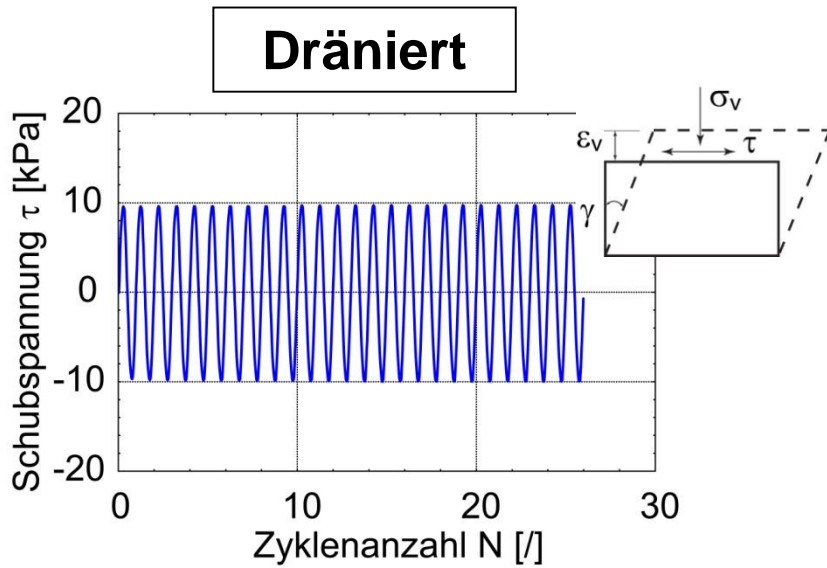
Verfestigung



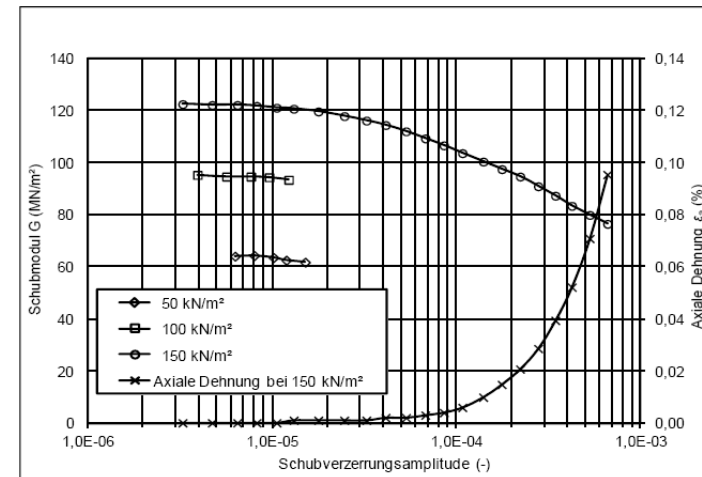
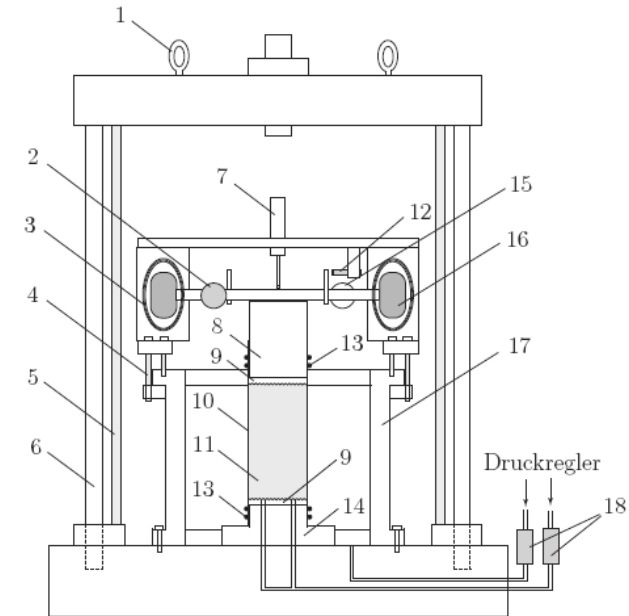
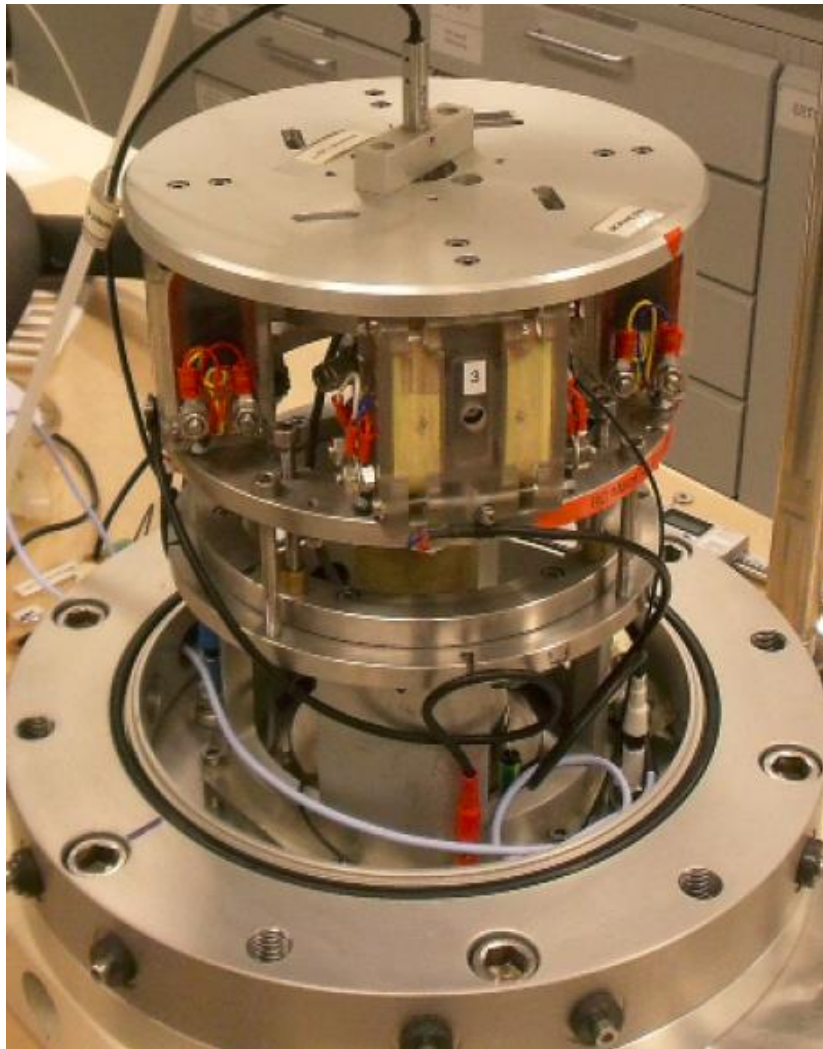
Verflüssigung



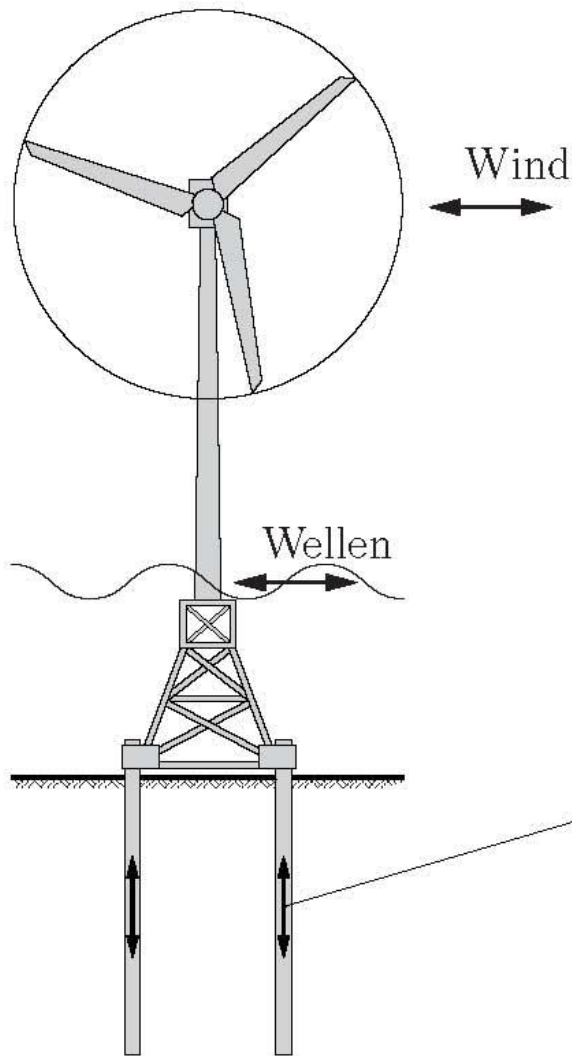
Zyklischer Einfachscherversuch mit Sand



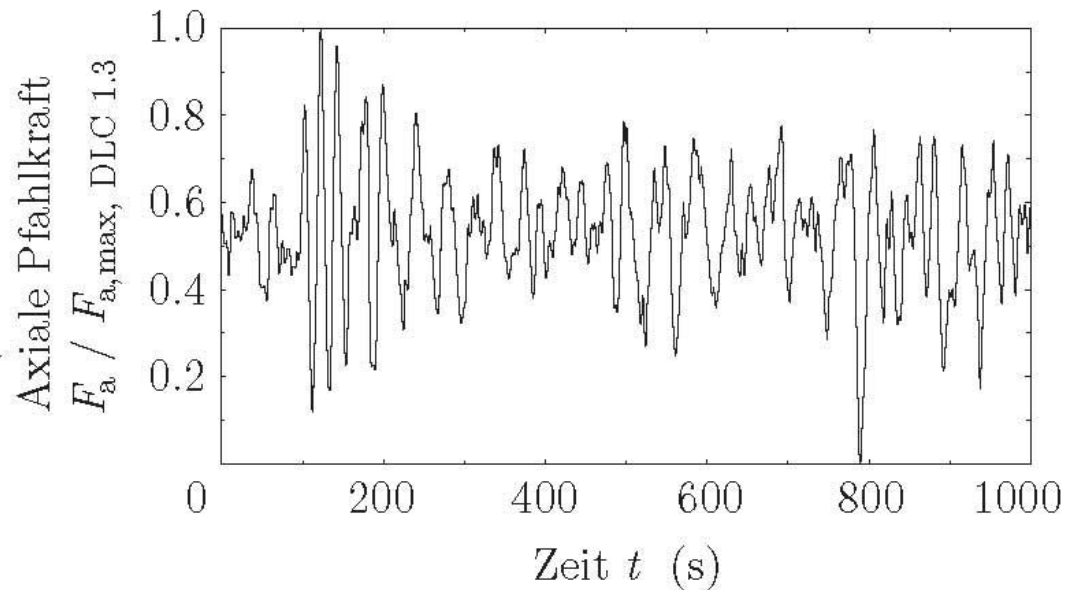
Resonanzsäulenversuch Quasi lineares (dyn.) Bodenverhalten

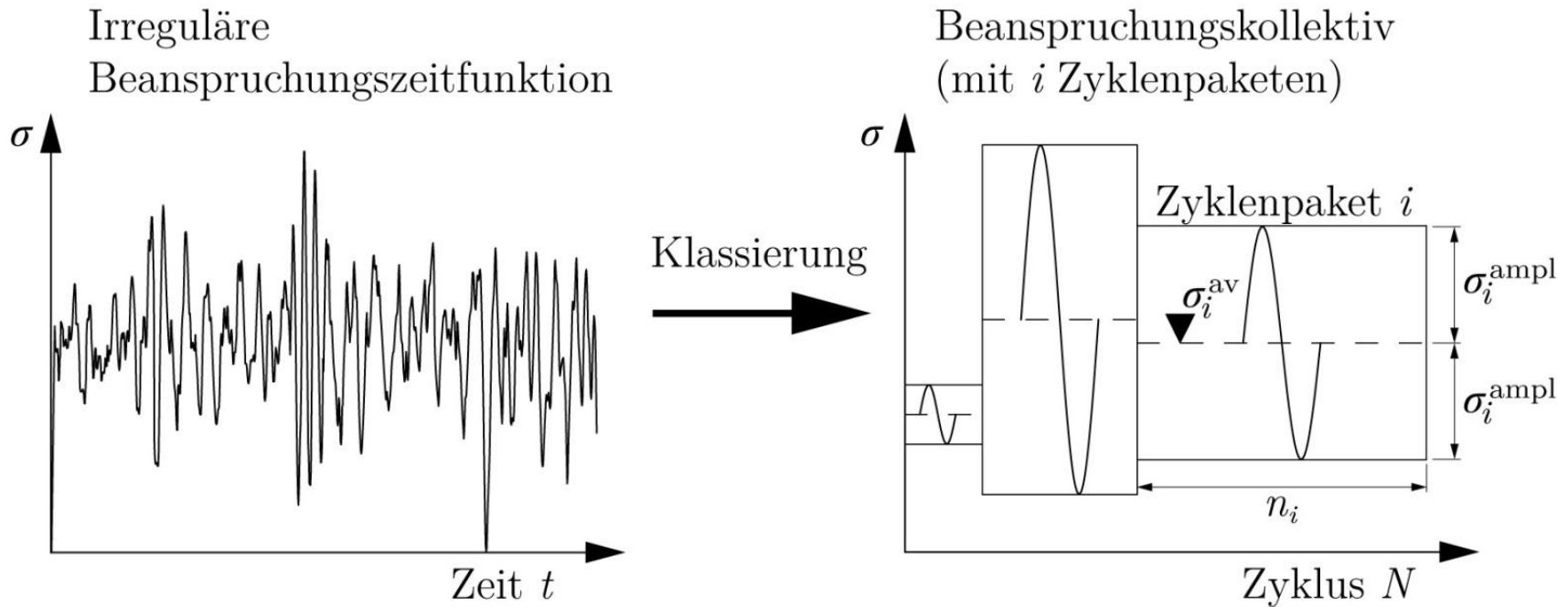


- Einleitung
- Bodenverhalten und geotechnische Untersuchungsmethoden
- **Irreguläre zyklische Einwirkungen**
- Multidirektionale zyklische Einwirkungen
- Zusammenfassung und Schlussfolgerungen



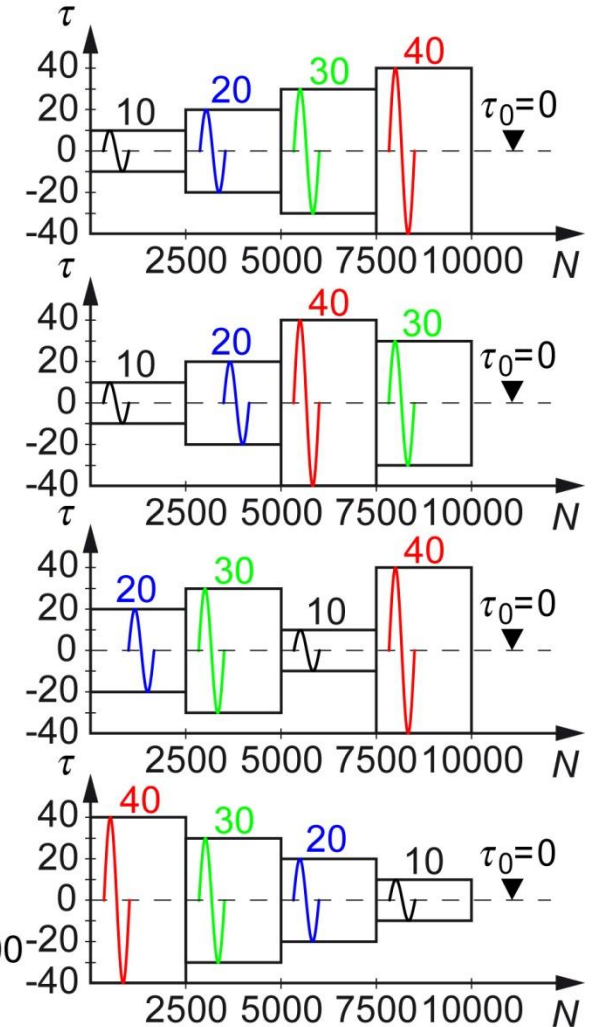
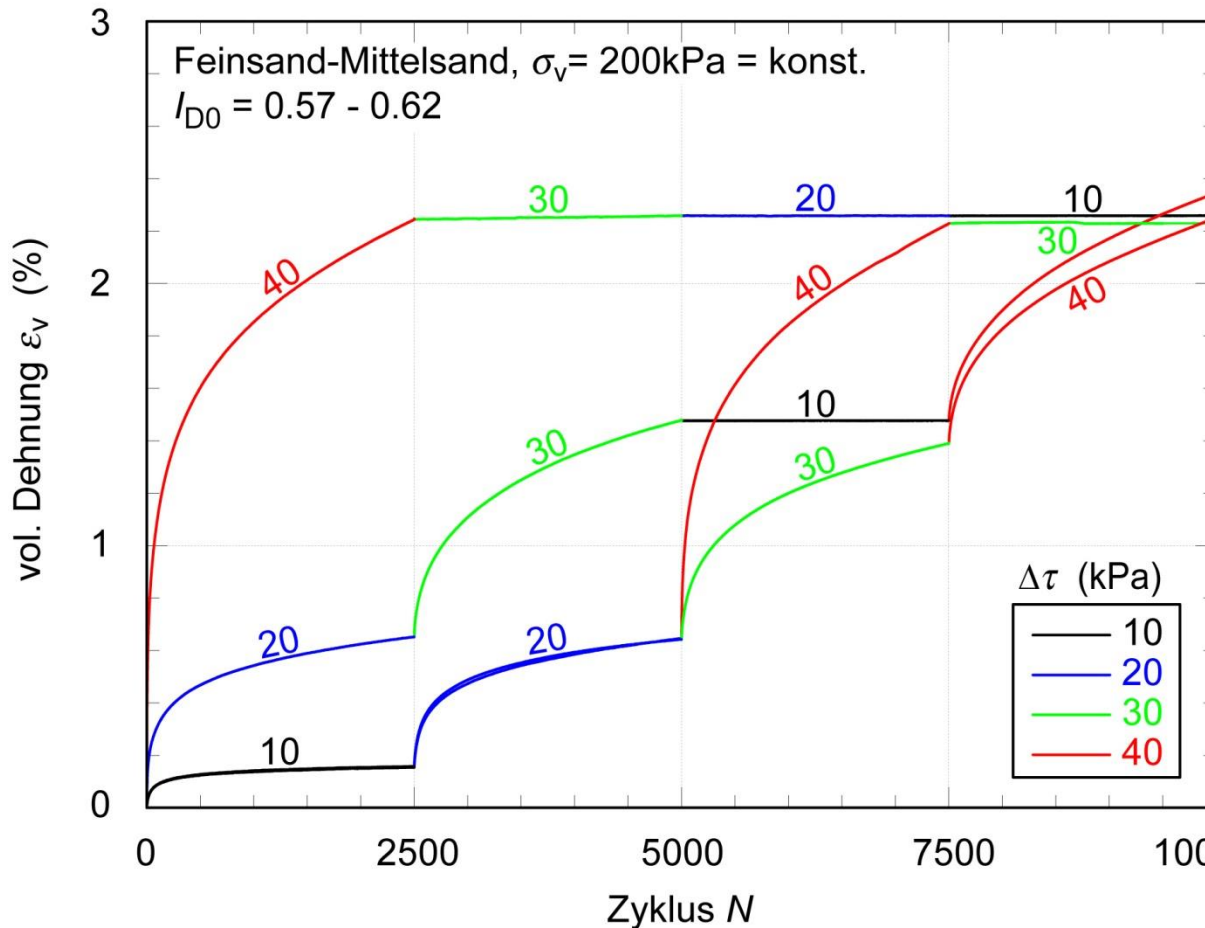
Irreguläre Beanspruchungszeitfunktion



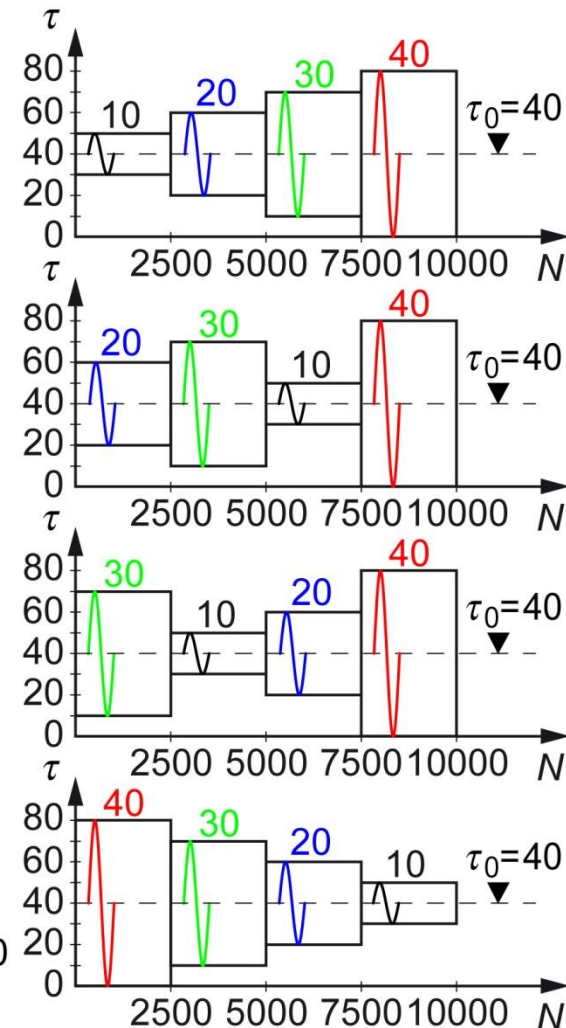
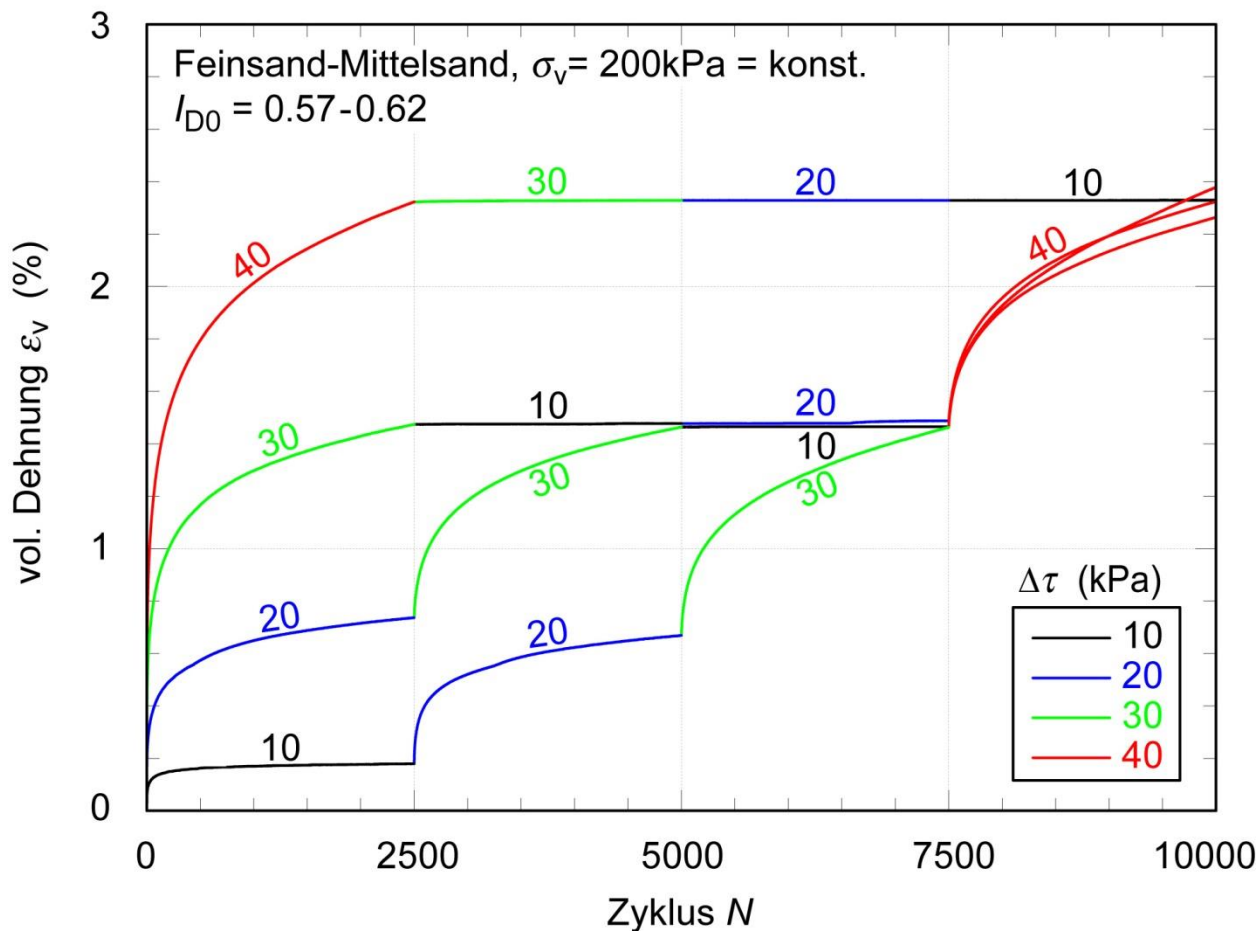


Umwandlung der irregulären Belastung in harmonische Zyklenpakete durch Klassierverfahren (exemplarisch)

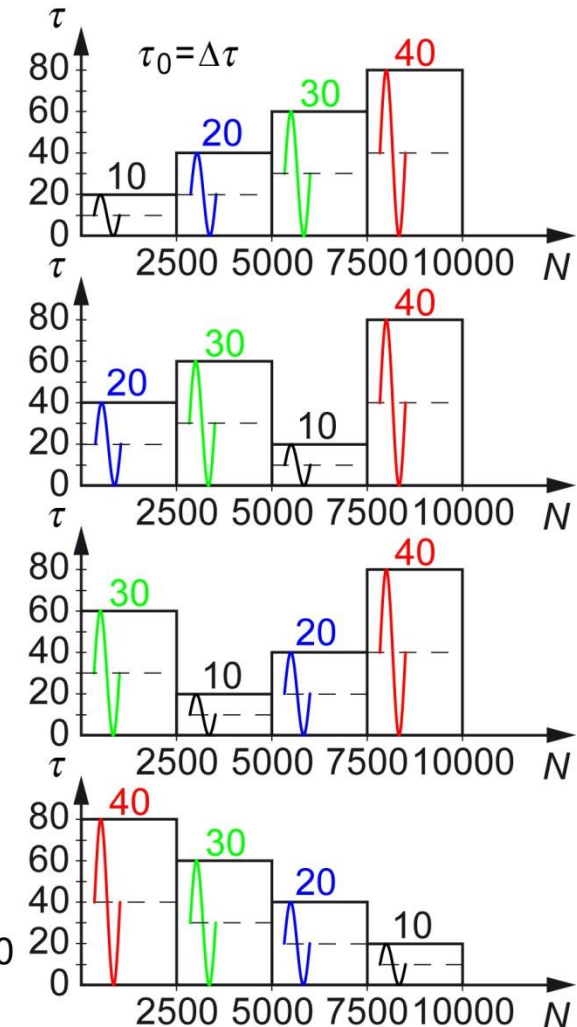
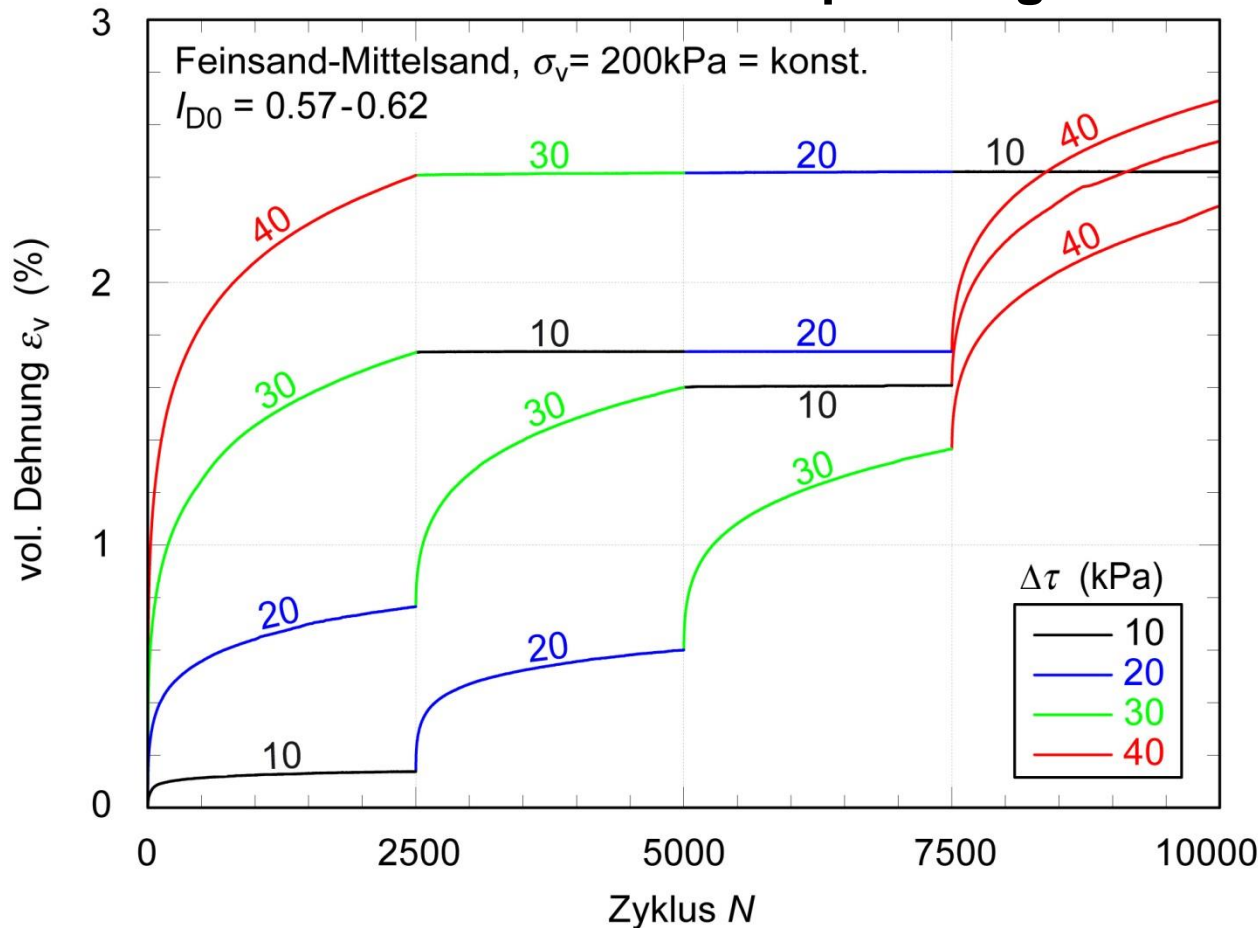
a) zykl. Einfachscherversuche - Wechsellast



b) zykl. Einfachscherversuche - Schwelllast



c) Zykl.Einfachscherversuche – Schwelllast Einfluss der Mittelspannung

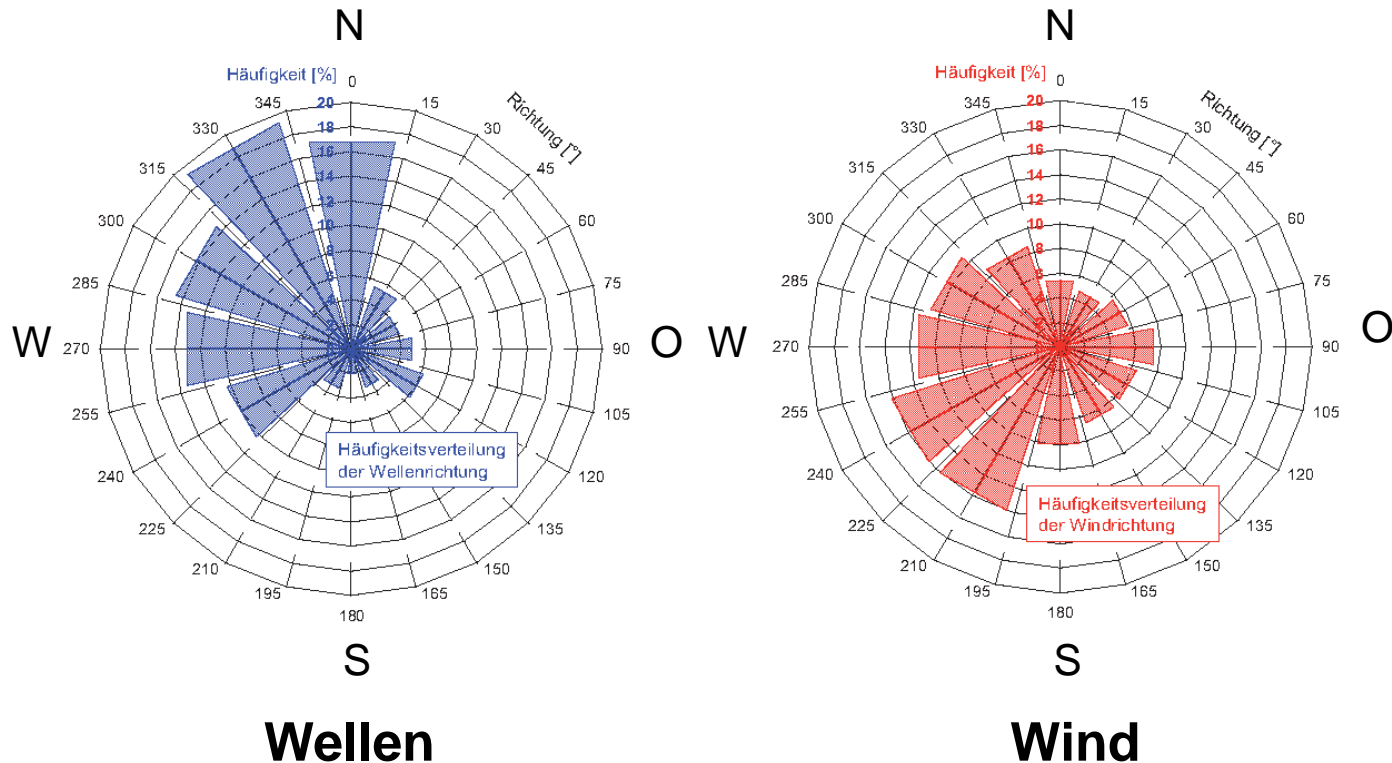


Zusammenfassung der Ergebnisse:

- bei konstantem mittleren Spannungsniveau ist die Reihenfolge unabhängig und die Miner-Regel gilt
- bei größeren Änderungen des mittleren Spannungsniveaus sind Abweichungen zu groß, Miner-Regel nicht anwendbar
- nach großen Belastungsamplituden werden durch kleinere Belastungen kaum noch zusätzliche Verformungen erzeugt
- bei ansteigenden Belastungsamplituden hat die Vorbelastung einen großen Einfluss auf die akkumulierten Verformungen

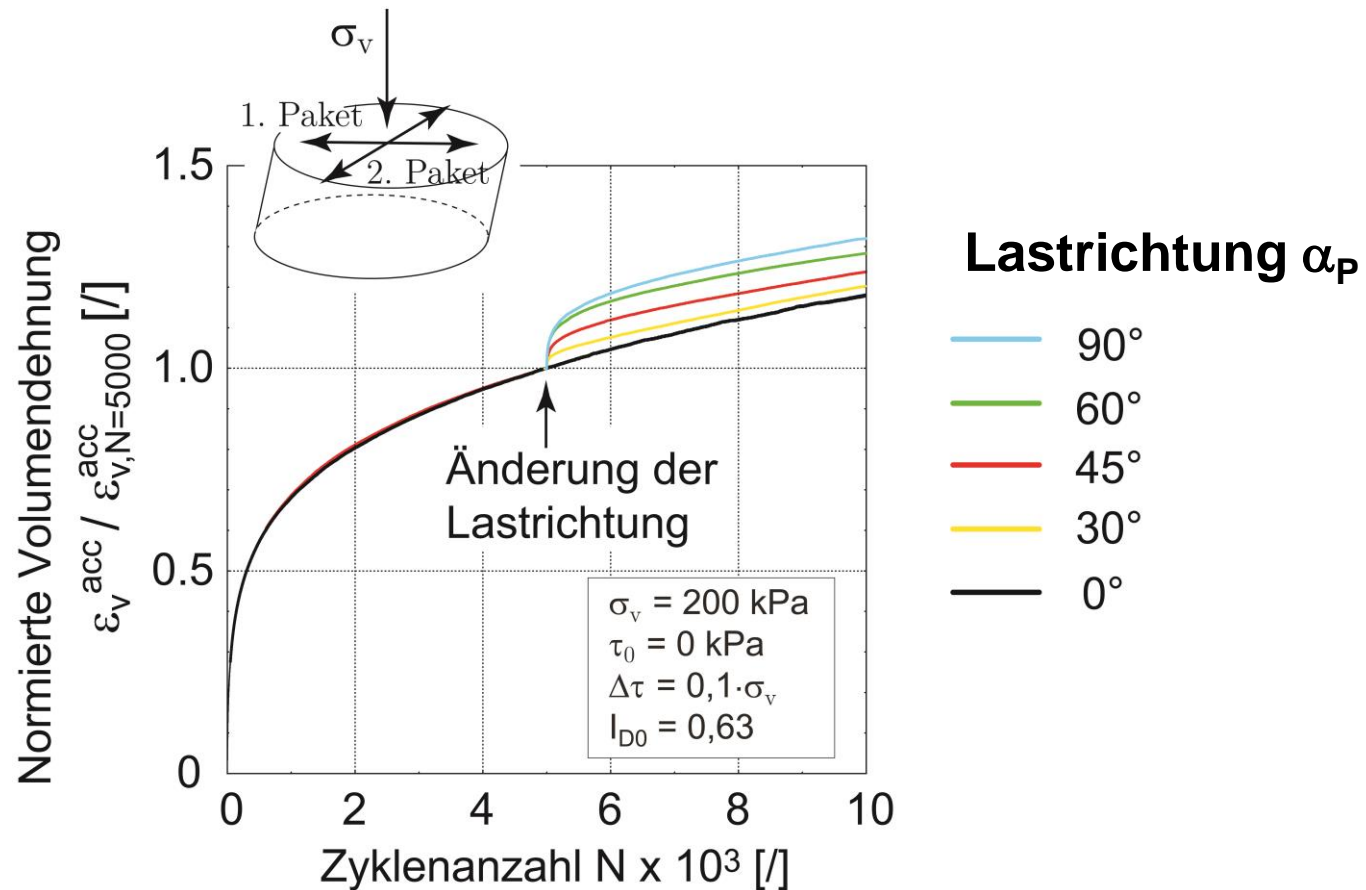
- Einleitung
- Bodenverhalten und geotechnische Untersuchungsmethoden
- Irreguläre zyklische Einwirkungen
- **Multidirektionale zyklische Einwirkungen**
- Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Häufigkeitsverteilung der Wellen- und Windrichtungen

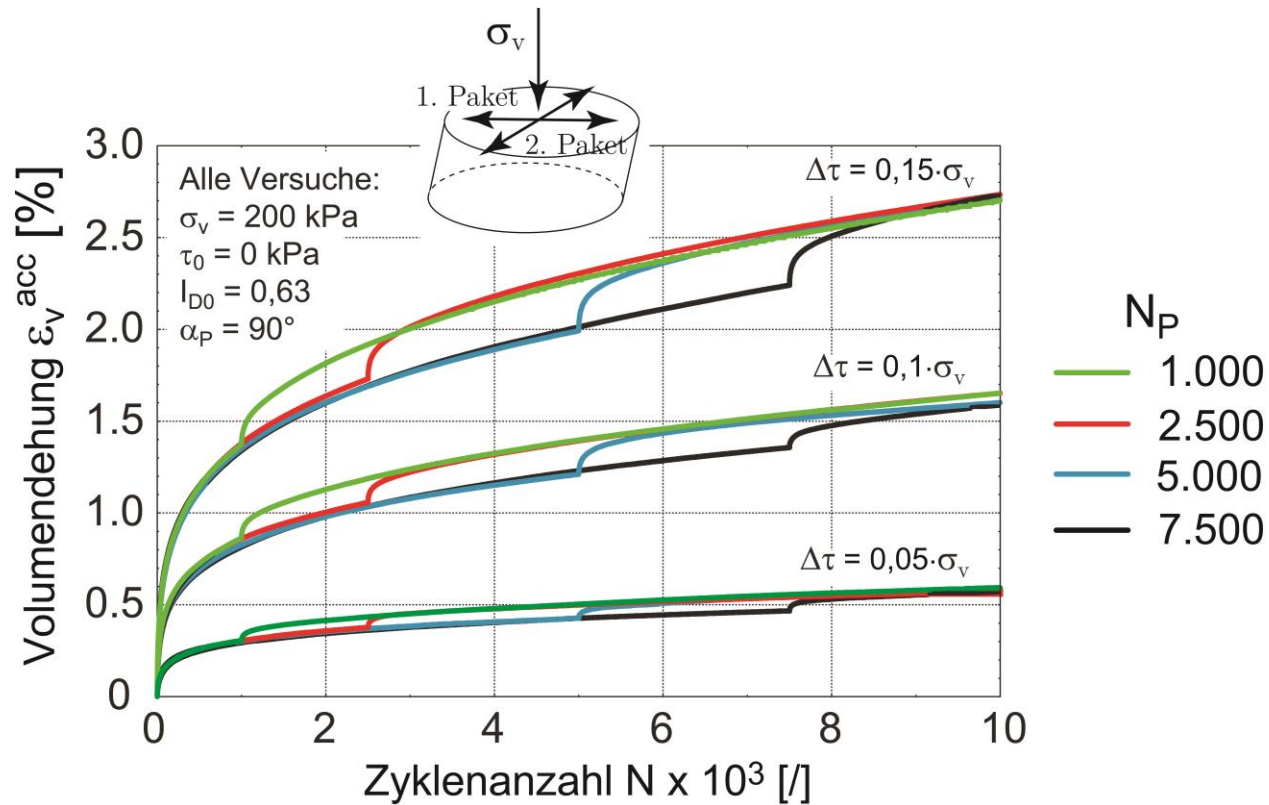


Exemplarisch für Windpark Albatros 1; aus Sedlacek et al., 2012

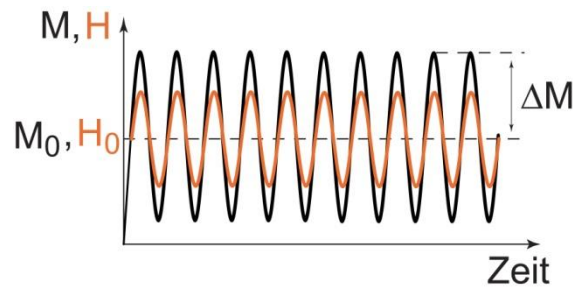
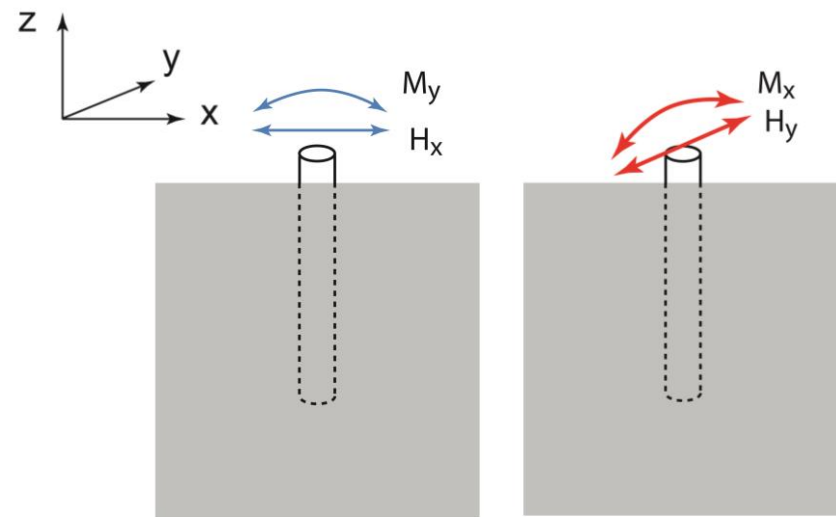
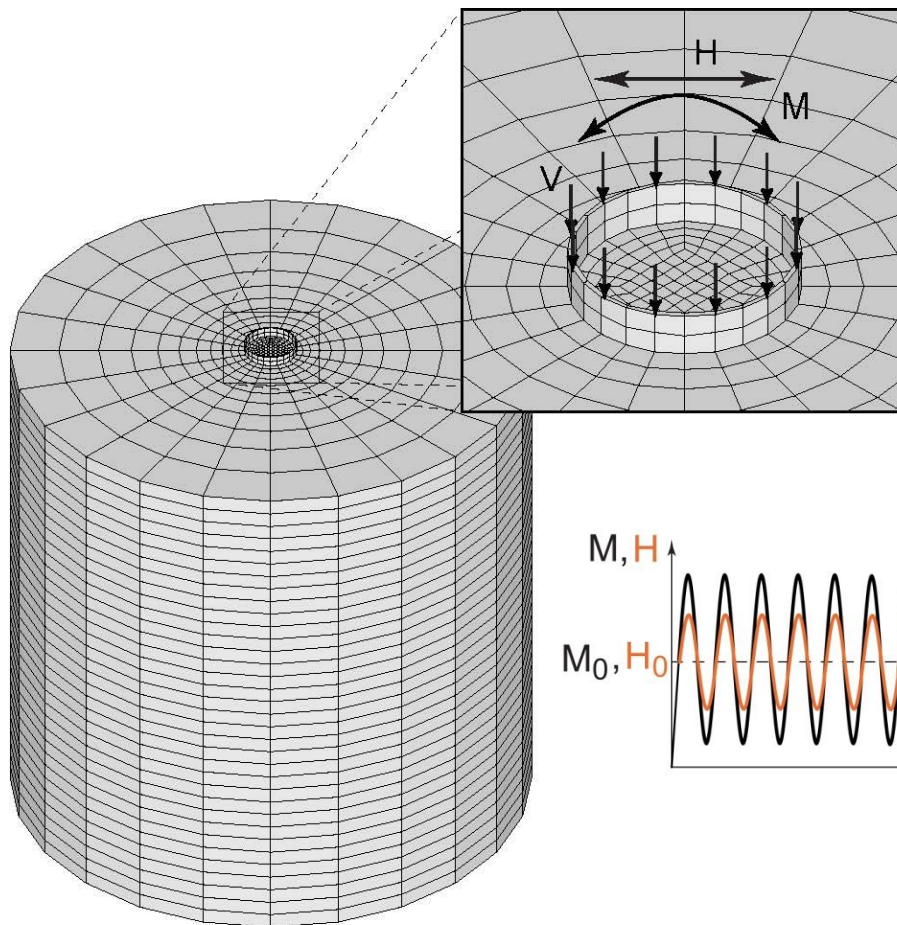
Volumendehnung bei Änderung der Lastrichtung (α_p)



Volumendehnung bei einer Änderung der Lastrichtung nach unterschiedlicher Zyklenanzahl N_p



Multidirektionale zyklische Einwirkungen FE Berechnung eines Monopiles



Pfahldurchmesser: 5 m

Wandstärke: 9 cm

Einbindetiefe: 30 m

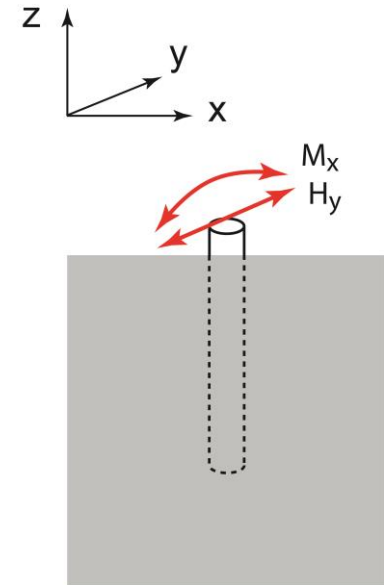
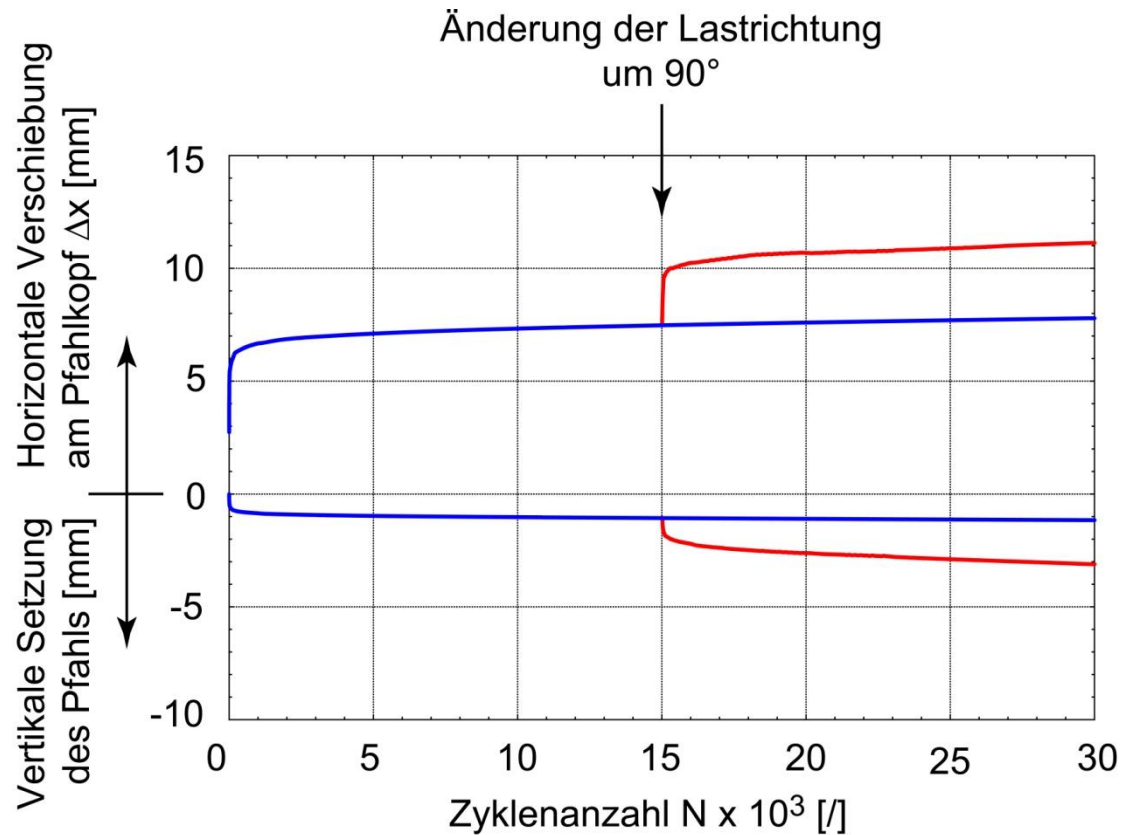
Belastung:

$V = 10 \text{ MN}$

$\Delta H = 0,65 \text{ MN}; H_0 = 0,81 \text{ MN}$

$\Delta M = 25 \text{ MNm}; M_0 = 30 \text{ MNm}$

Multidirektionale zyklische Einwirkungen FE Berechnung eines Monopiles



Multidirektionale zyklische Einwirkungen Einfluss der Belastungsrichtung



Zusammenfassung der Ergebnisse:

- bei Änderung der Belastungsrichtung steigt die akkumulierte Dehnung sprunghaft an
- der Dehnungszuwachs hängt hauptsächlich vom Änderungswinkel der Belastungsrichtung ab
- der Zeitpunkt der Änderung der Belastungsrichtung hat keinen Einfluss auf den Endwert der akkumulierten Dehnung
- FE Berechnungen haben gezeigt, dass bei einem horizontal belasteten Monopfahl die Änderung der Belastungsrichtung ebenfalls sprunghafte Änderungen der Verformungen verursacht

- Einleitung
- Bodenverhalten und geotechnische Untersuchungsmethoden
- Irreguläre zyklische Einwirkungen
- Multidirektionale zyklische Einwirkungen
- **Zusammenfassung und Schlussfolgerungen**

- **Böden sind natürliche Materialien**, deren Heterogenität bei der Ermittlung des Materialverhaltens und der Materialparameter zu berücksichtigen ist.
- Die **Kosten** für die Ermittlung der Materialparameter von Stahl sind in den Materialkosten bereits eingepreist, beim Boden sind diese Kosten „zusätzlich“ vom Bauherrn in der Planungsphase aufzubringen (Stichwort: *Baugrundrisiko*).
- Die **Planung des geotechnischen Untersuchungsprogramms** muss bei OWEA **zyklische/dynamische Laborversuche** enthalten
 - **Einfachserversuche**
 - **Triaxialversuche** (*nicht vorgestellt*)
 - **Resonanzsäulenversuche**
 - **Bender Element Versuche** (*nicht vorgestellt*)
- **Sorgfältige Laboruntersuchungen** der relevanten Böden sind notwendig, d.h. man sollte nicht am falschen Ende sparen!

**Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit**