Universität Rostock
Institut für Wasserbau

Beanspruchung und Bemessung von Holzpfählen im Küstenwasserbau

BMBF/KFKI-Forschungsvorhaben 03KIS023

2001-2005

Universität Rostock in Kooperation mit dem Staatlichen Amt für Umwelt und Natur Rostock

Holzpfahlbuhnen in Mecklenburg-Vorpommern

Insgesamt ca. 1.000 Buhnen

Neubau von ca. 50 Buhnen / Jahr

Jährlicher Einbau von
ca. 35.000 m Tropenholz-Pfählen

Jährliche Kosten von ca. 1,65 Mio €
(Material, Rammkosten)

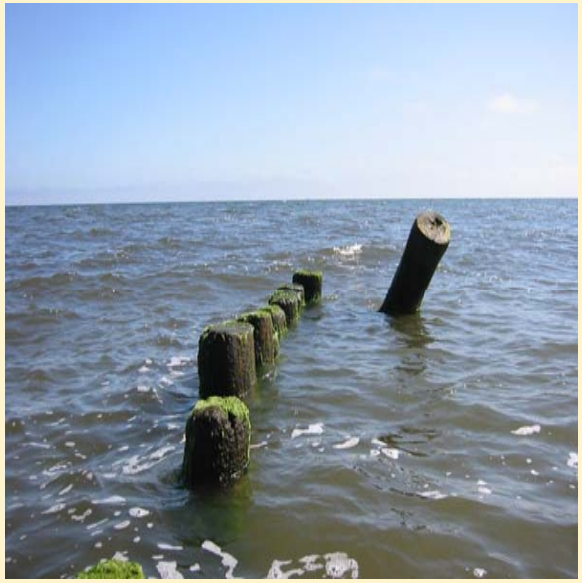
Jährliches Einsparpotential von ca.
100.000 € / 0,5 m Pfahlverkürzung

Kostenersparnis möglich ?

Bemessung von Buhnenpfählen

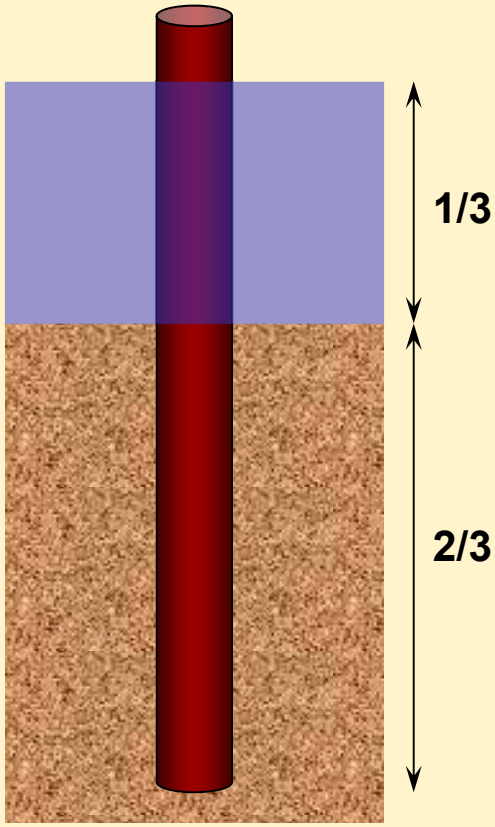
Rammtiefe zu groß ⇨
- Materialkosten
- Baukosten

Rammtiefe zu klein ⇨
- Stabilitätsprobleme

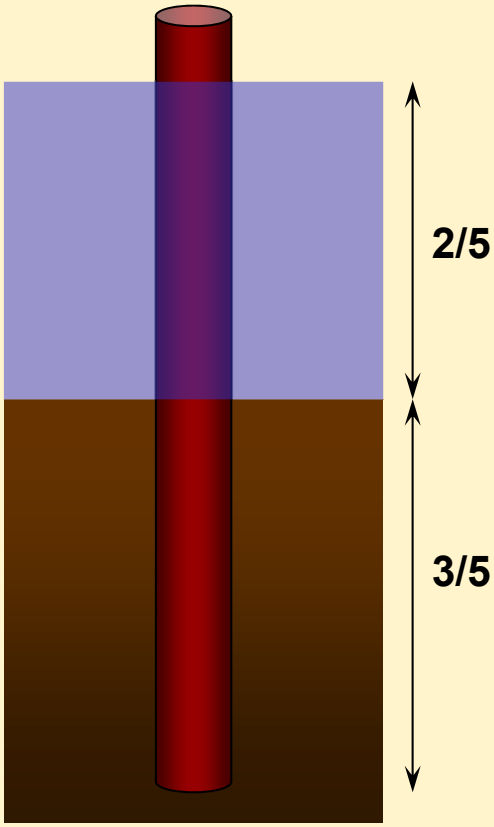


Bemessung von Buhnenpfählen

- seit 100 Jahren nach „Erfahrungen“
- Eingangsgröße für die Berechnung - Wassertiefe



Nichtbindiger Baugrund



Bindiger Baugrund

Forschungsprojekt

Entwicklung eines Bemessungsansatzes zur Dimensionierung der Einspannlänge von Buhnenpfählen, abhängig von:

- Wellenbelastung
- Eislasten
- Wassertiefe
- Baugrundeigenschaften
- Schorreveränderungen

Lastfall Pfahlschwingungen / Bodenverflüssigung

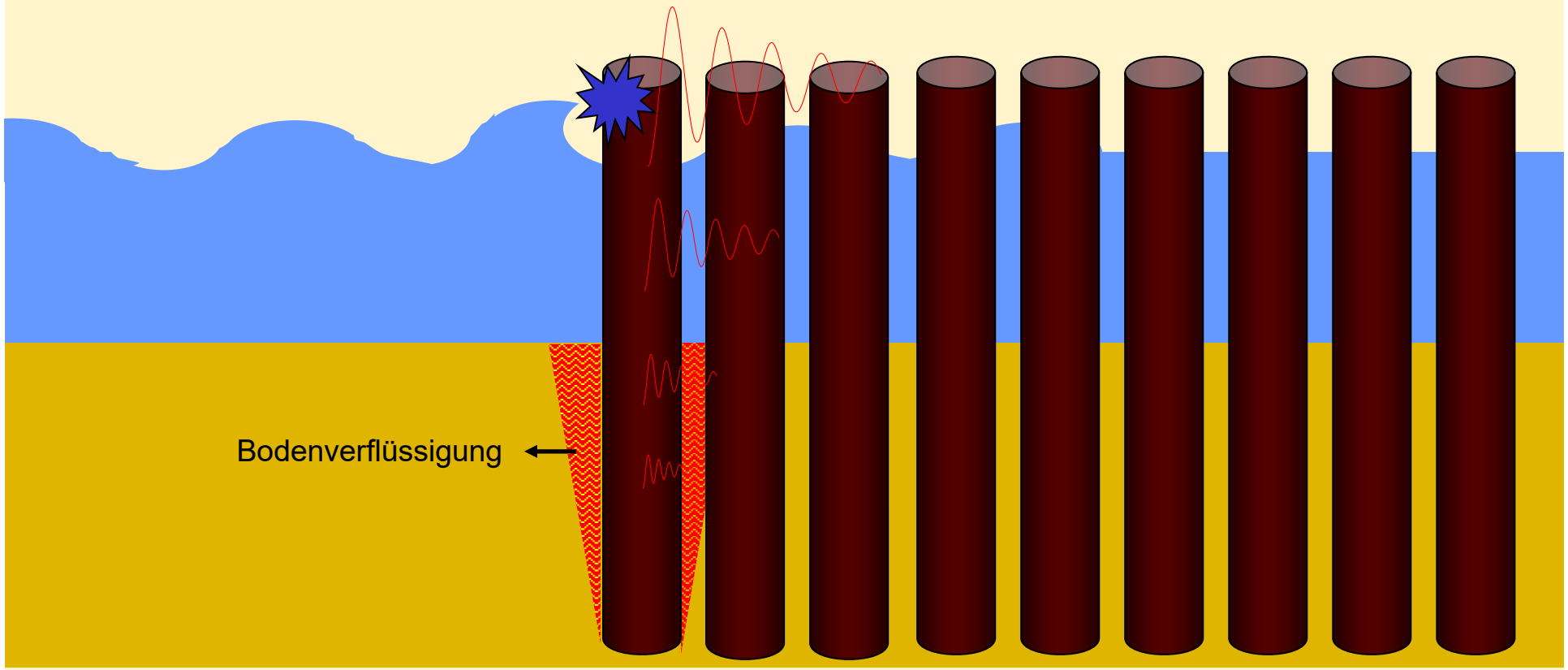
- Erfassung seegangsinduzierter Pfahlbewegungen
- Pfahlschwingung - Porenwasserdruck
- Bodenverflüssigungseffekte / Standsicherheit

Lastfall Vertikale Eislasten

- Ermittlung von vertikalen Eislasten auf Pfähle
- Bestimmung der Haltekräfte (Zugversuche)

Seegangsbelastung auf Buhnenpfähle

Seegangsbelastung auf Buhnenpfähle



Bodenverflüssigung

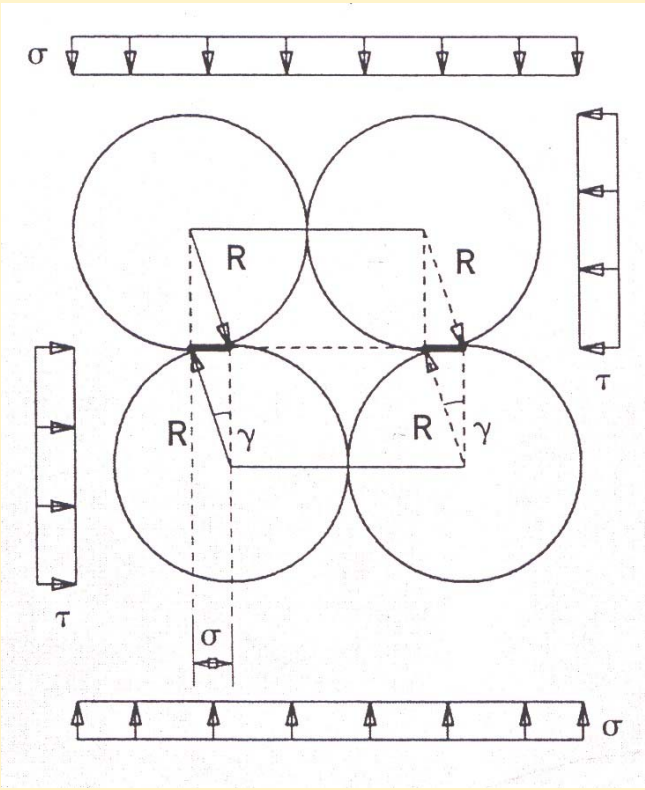
Scherdehnung: $\gamma = \frac{v}{c}$ $\quad c = 200\,\frac{m}{s}$ (Sand)

Grenzscherdehnung: $$\gamma_t = 3^{2/3}\,\frac{(2-\upsilon)(1+\upsilon)}{(1-\upsilon^2)^{1/3}}\cdot f\cdot\frac{\sigma^{2/3}}{E^{2/3}}$$

$$\gamma_t = 1{,}33\cdot 10^{-5}\cdot\sigma^{2/3}$$

Grenzscherdehnung Porenwasserüberdruck: $$\gamma_{tü} = 1{,}33\cdot 10^{-5}\cdot\sigma^{2/3}\cdot\left(1-\frac{\Delta u}{\sigma}\right)^{2/3}$$

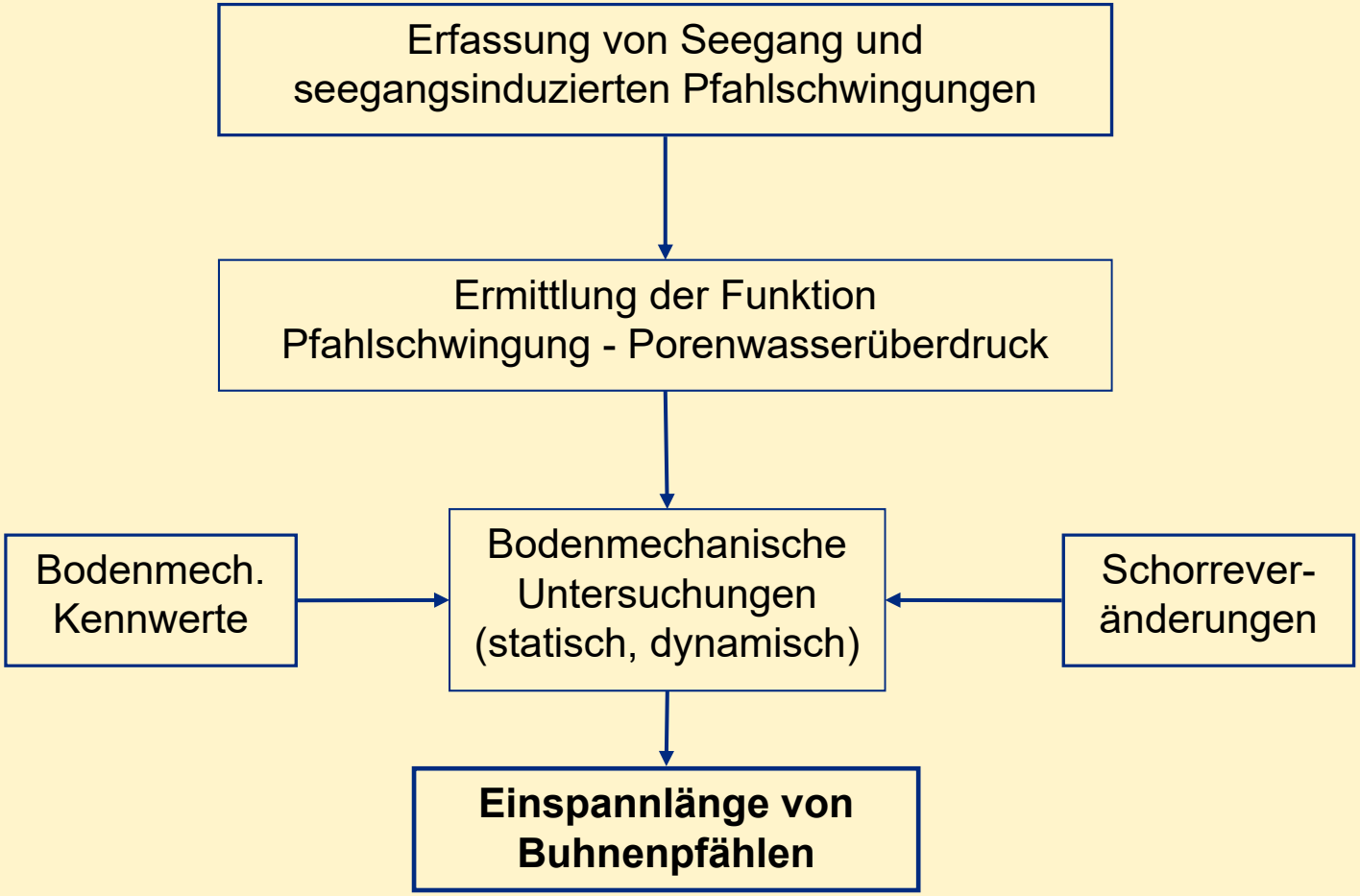
(TRIANTAFYLLIDIS 1998)



v = Partikelgeschwindigkeit ⟶ Frequenz, Amplitude

Δu = Porenwasserüberdruck

Untersuchung von Belastung und Wirkung am Pfahl und im Boden

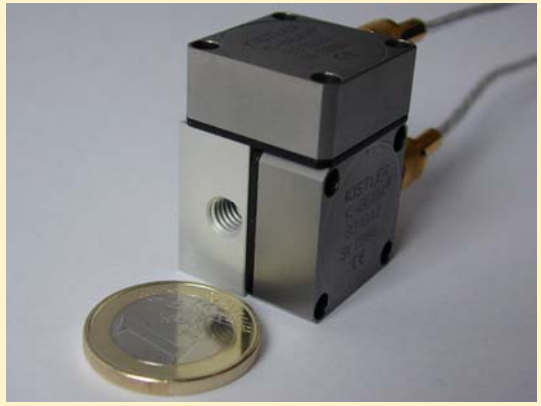


Seegang und seegangsinduzierte Pfahlbewegungen

- Aufbau von Versuchsstandorten in Heiligendamm, Markgrafenheide, Zingst
- Kopfpfahl, Pfahlreihe

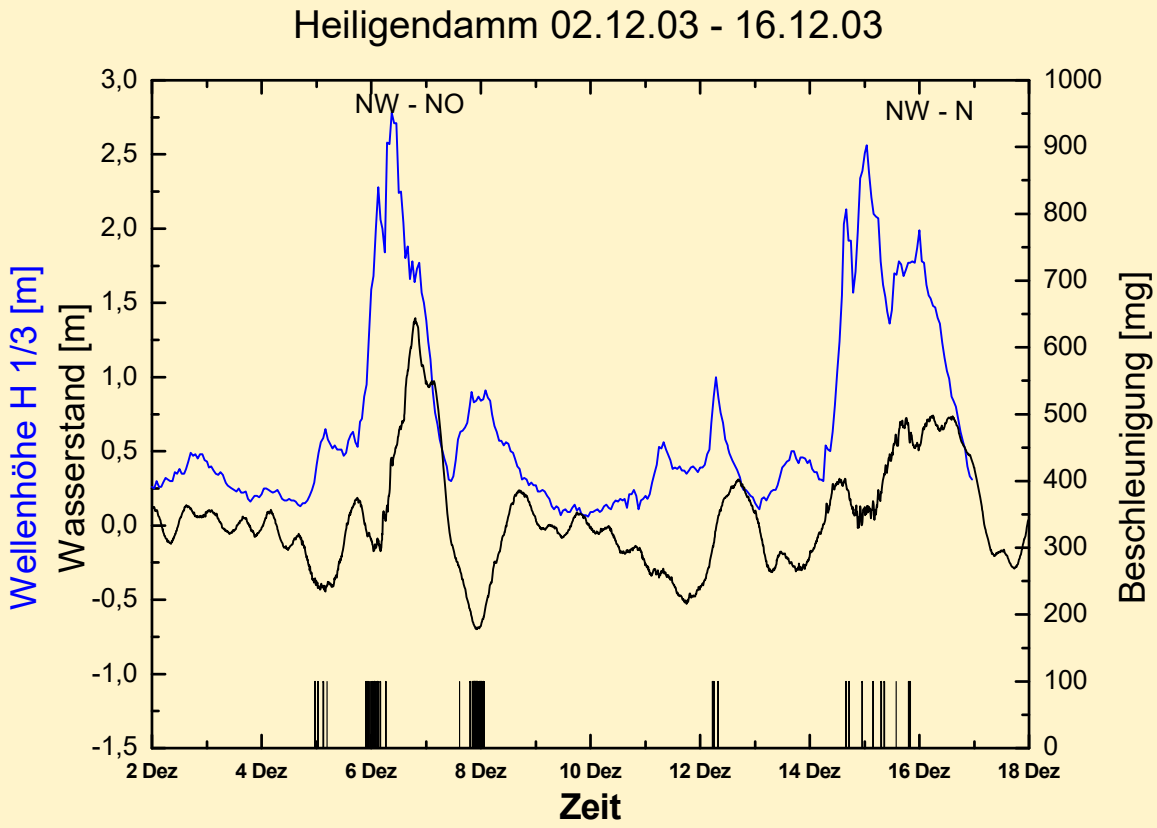
Versuchseinrichtung

Seegang und seegangsinduzierte Pfahlbewegungen



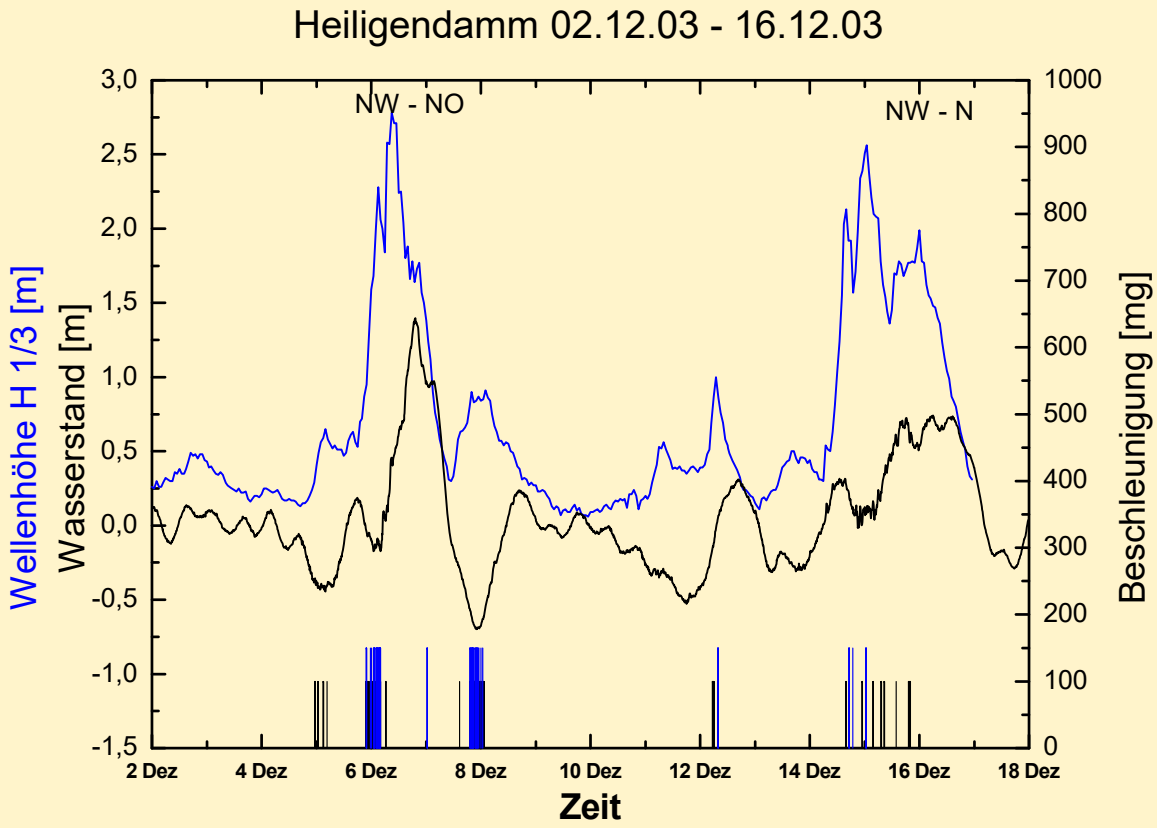
Seegangsinduzierte Pfahlbewegungen

Messergebnisse



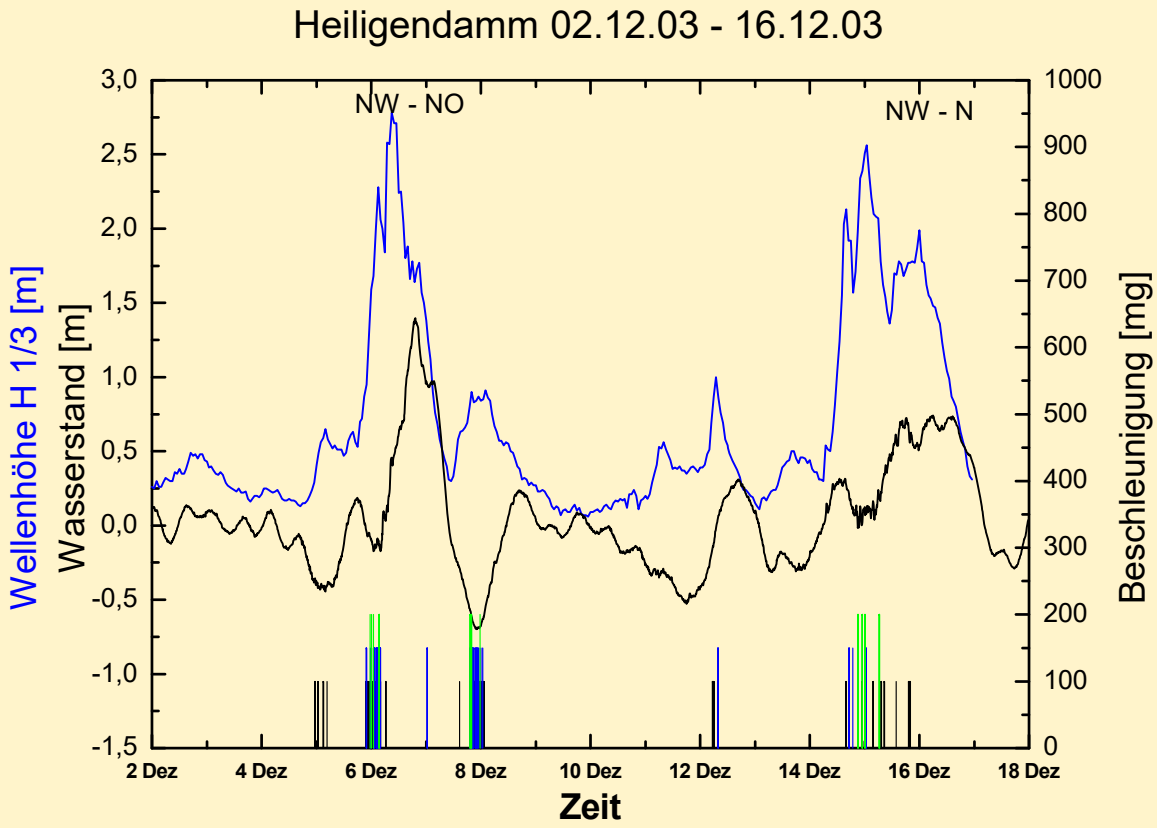
Seegangsinduzierte Pfahlbewegungen

Messergebnisse



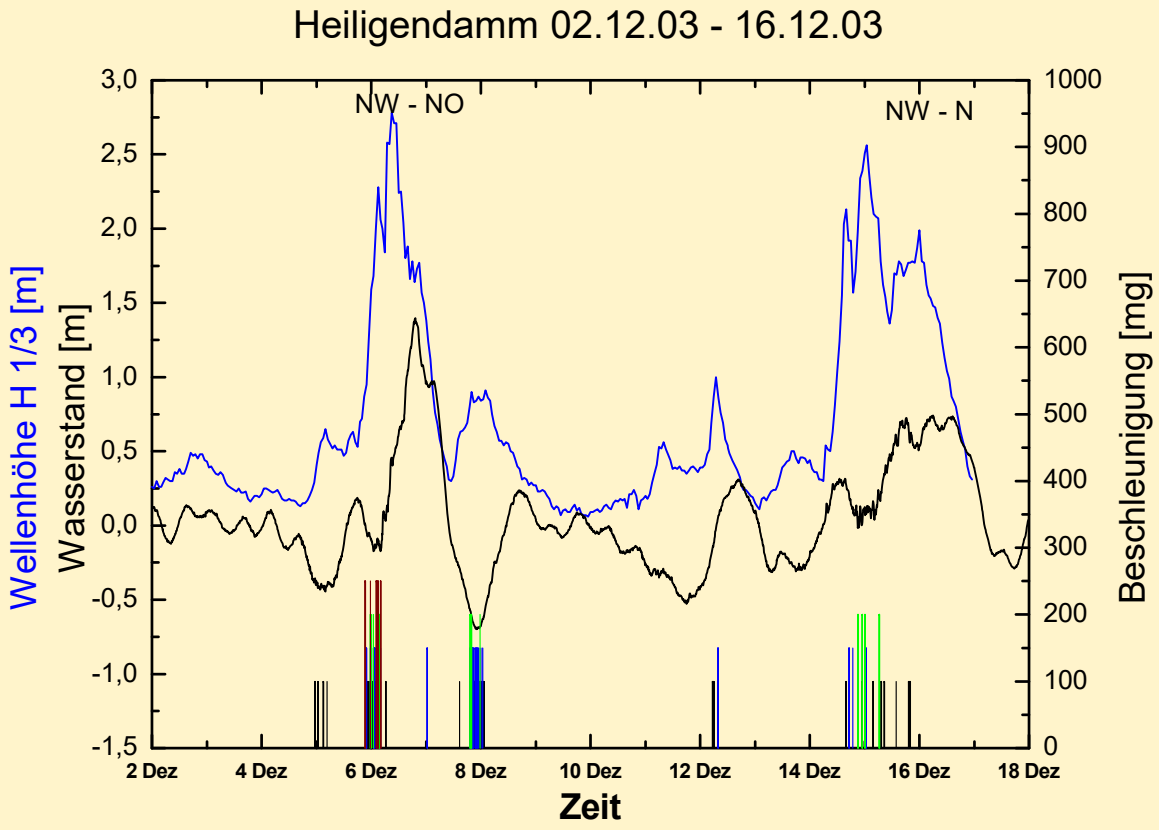
Seegangsinduzierte Pfahlbewegungen

Messergebnisse



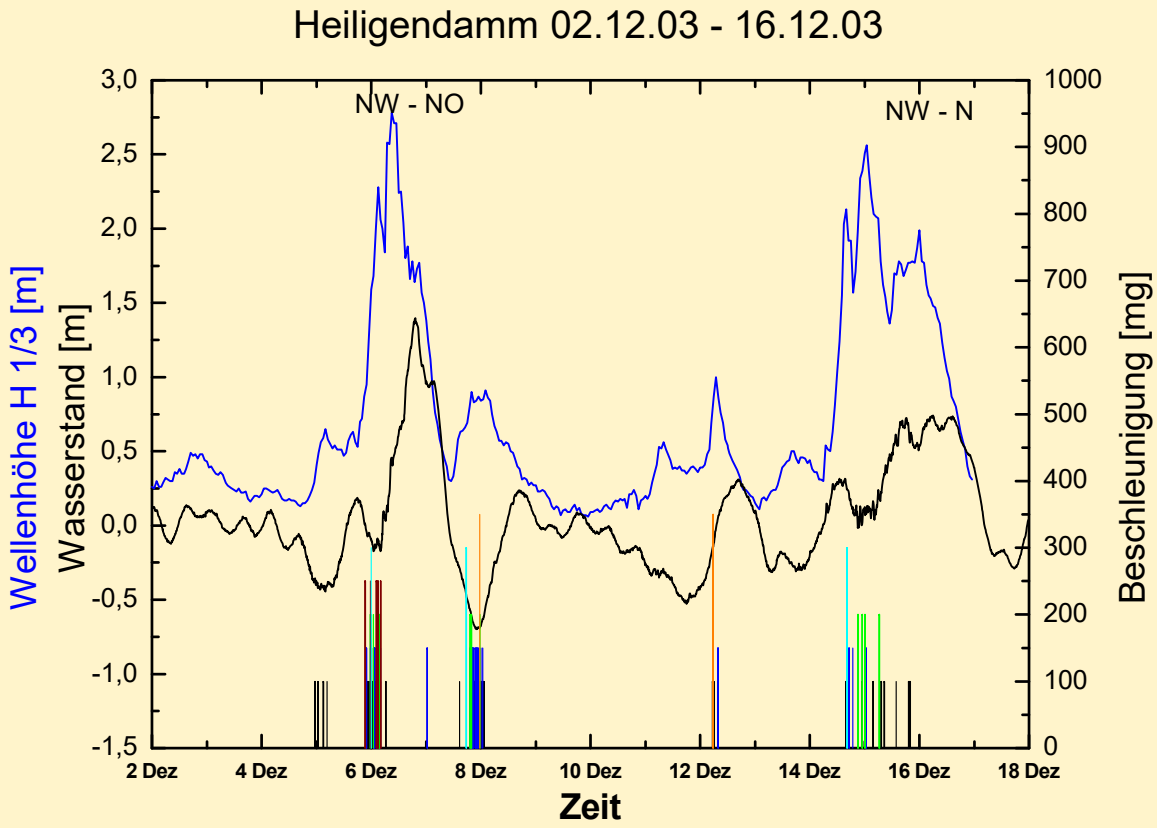
Seegangsinduzierte Pfahlbewegungen

Messergebnisse



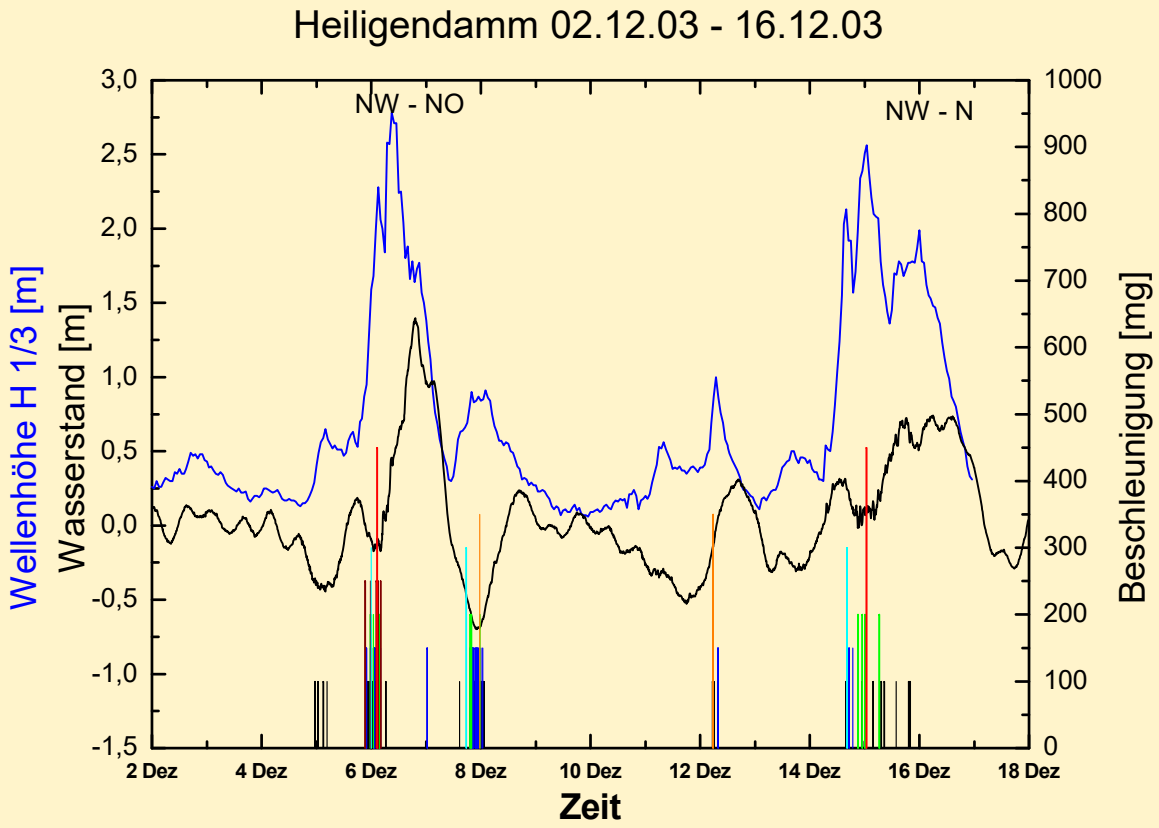
Seegangsinduzierte Pfahlbewegungen

Messergebnisse



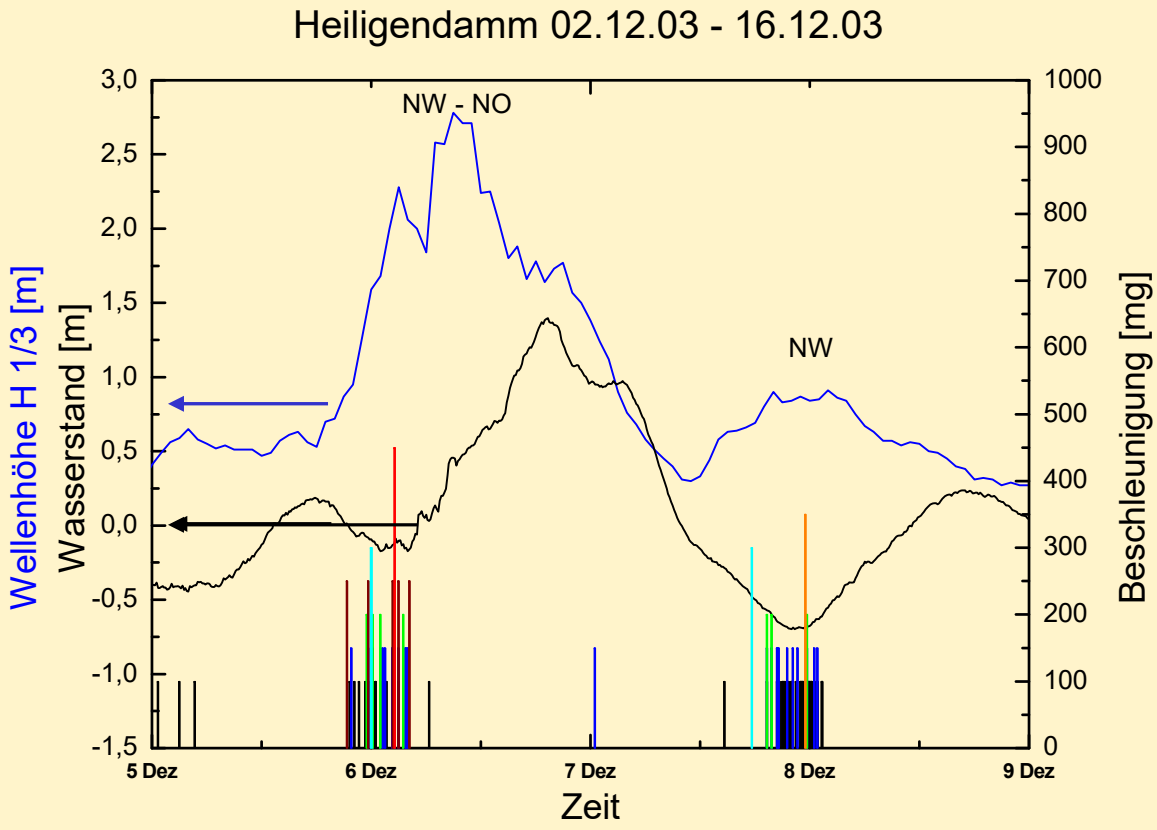
Seegangsinduzierte Pfahlbewegungen

Messergebnisse



Seegangsinduzierte Pfahlbewegungen

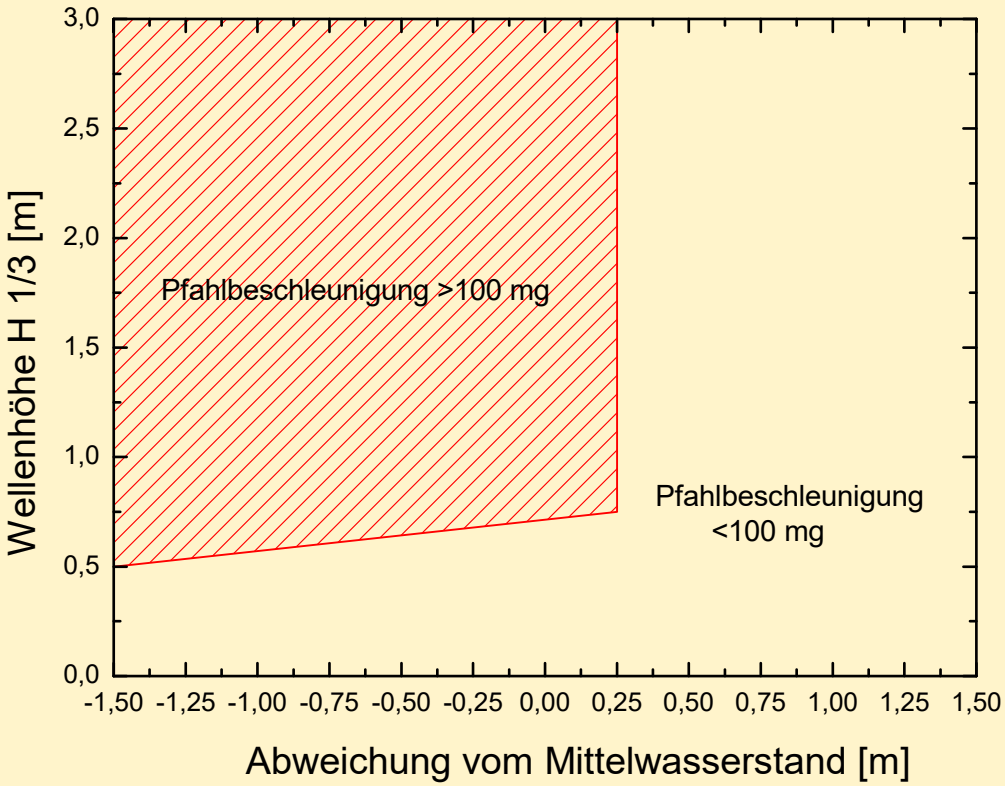
Messergebnisse



Seegangsinduzierte Pfahlbewegungen

Wellenhöhe H 1/3 >0,5m

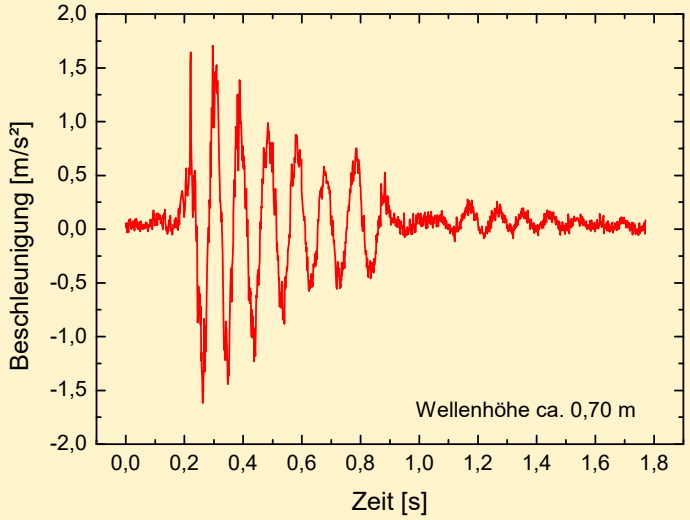
Wasserstand <0,25 m ü. MW



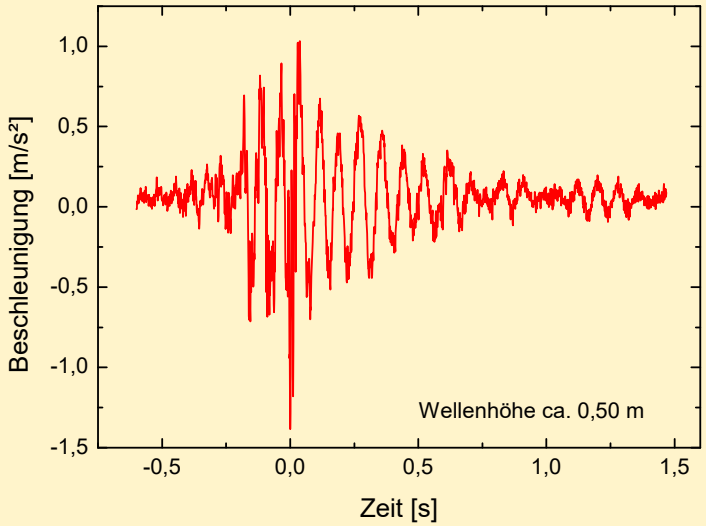
Seegangsinduzierte Pfahlbewegungen

Messergebnisse Markgrafenheide B 41

Gedämpfte Schwingung →



Überlagerung von Schwingungen →



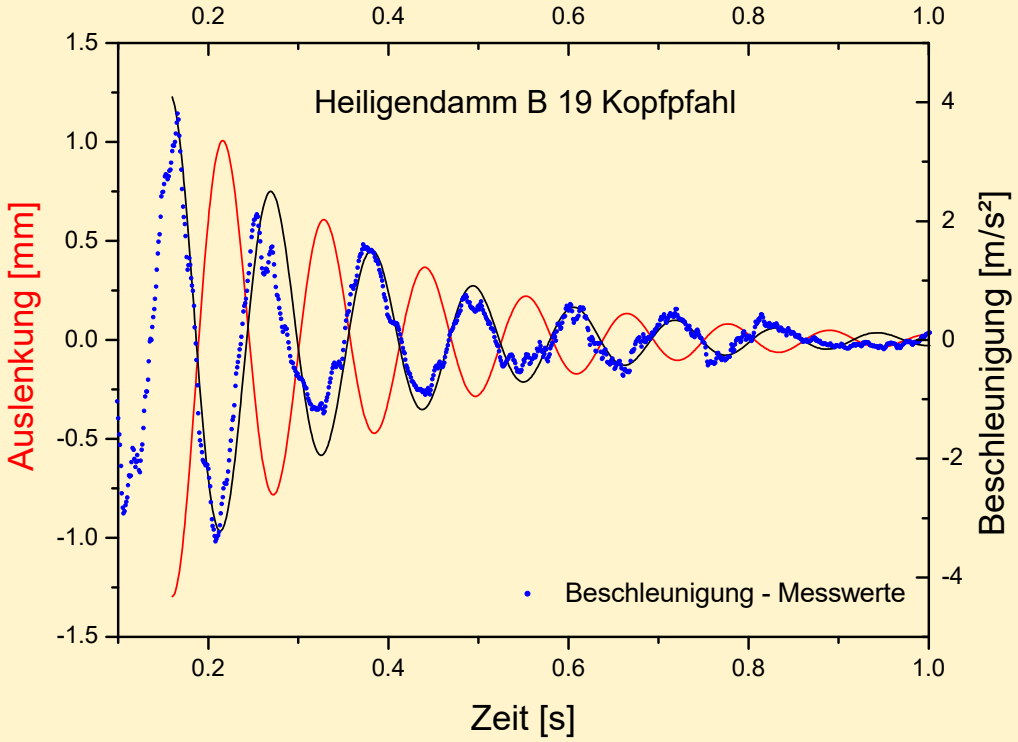
Auswertung Pfahlbewegungen

Auslenkung: $$y = y_0 e^{(-\delta \cdot t)} \cos(\omega_d t + \phi_0)$$

Geschwindigkeit: $$\frac{\partial}{\partial t} y = -\delta \cdot y_0 e^{(-\delta \cdot t)} \cos(\omega_d t + \phi_0) - \omega_d \cdot y_0 e^{(-\delta \cdot t)} \sin(\omega_d t + \phi_0)$$

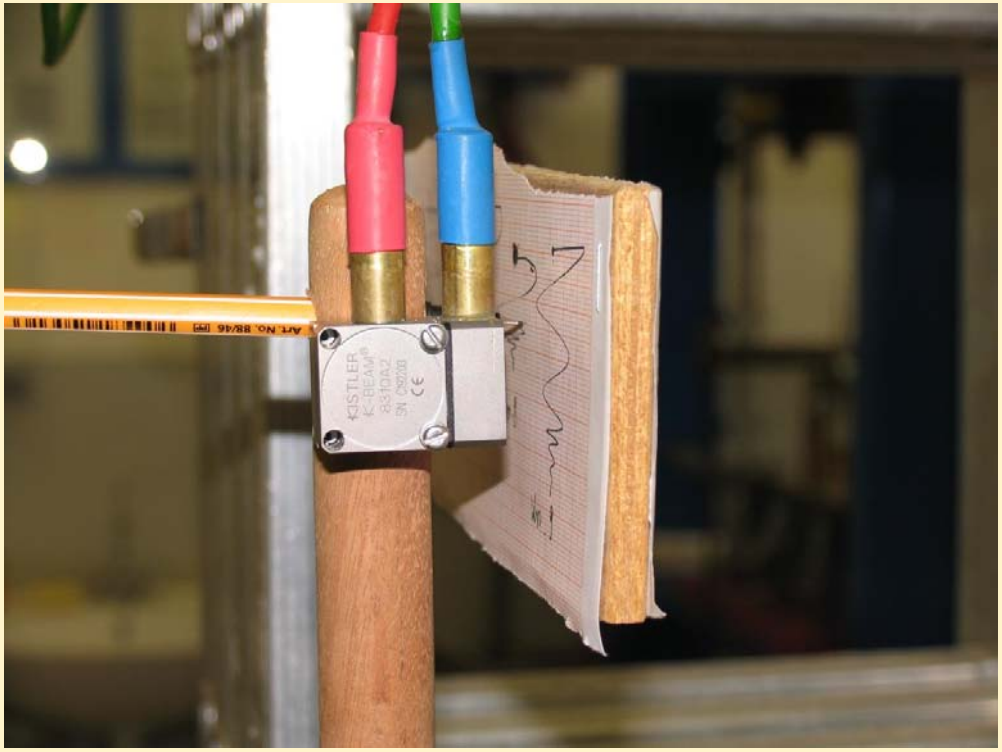
Beschleunigung: $$\frac{\partial^2}{\partial t^2} y = \delta^2 \cdot y_0 e^{(-\delta \cdot t)} \cos(\omega_d t + \phi_0) - \omega_d{}^2 \cdot y_0 e^{(-\delta \cdot t)} \cos(\omega_d t + \phi_0) + 2\delta\omega_d \cdot y_0 e^{(-\delta \cdot t)} \sin(\omega_d t + \phi_0)$$

max. Beschleunigung: 4 m/s²
max. Amplitude: 1,3 mm



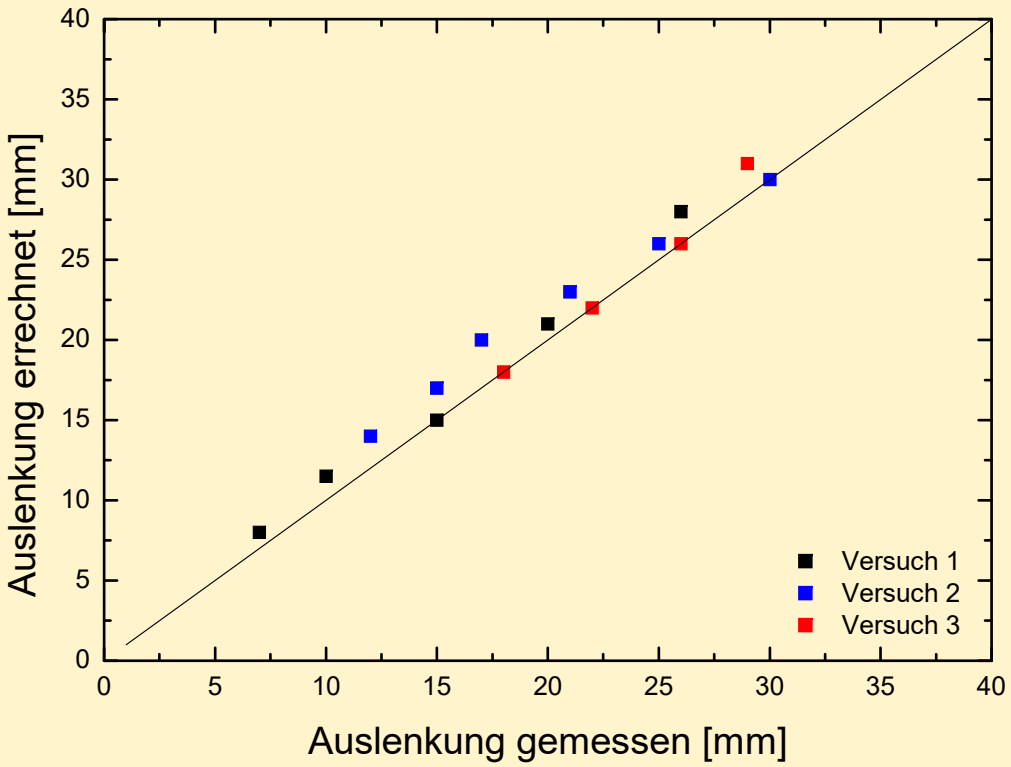
Auswertung Pfahlbewegungen

Kontrolle Auswertungsalgorithmus



Auswertung Pfahlbewegungen

Kontrolle Auswertungsalgorithmus



Seegangsinduzierte Pfahlbewegungen:

Erkenntnisse:

- Pfahlschwingungen treten nur bei Belastung der Pfahlköpfe durch brechende Wellen auf.

  Voraussetzungen: Wellenhöhe $H_{1/3}$ >0,50 m
  Wasserstand <0,25 m über MW
- Die Schwingungsfrequenzen liegen in einem Bereich, in dem Bodenverflüssigung möglich ist.
- Die Schwingungen wurden in sandigem Baugrund bis in den Boden nachgewiesen.
- Die Schwingungsdauer eines Pfahls ist bei Überlagerung von Schwingungen mit den Schwingungen der Nachbarpfähle größer als zunächst vermutet.
- Die ermittelten Amplituden betragen am Pfahlkopf einige Millimeter und im Boden wenige Zehntelmillimeter.

Bodenverflüssigung

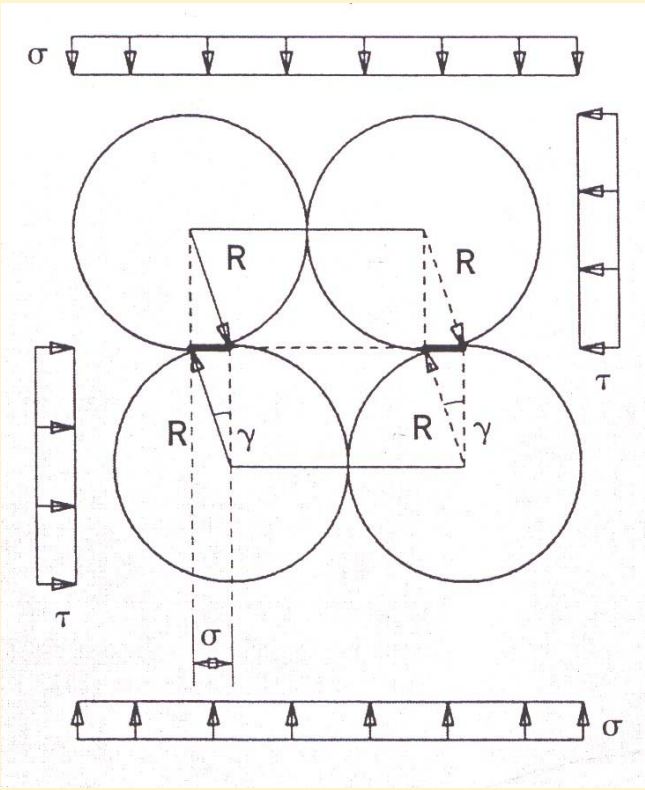
Scherdehnung: $\gamma = \frac{v}{c}$ $c = 200\frac{m}{s}$ (Sand)

Grenzscherdehnung: $\gamma_t = 3^{2/3}\frac{(2-\upsilon)(1+\upsilon)}{(1-\upsilon^2)^{1/3}} \cdot f \cdot \frac{\sigma^{2/3}}{E^{2/3}}$

$$\gamma_t = 1{,}33 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma^{2/3}$$

Grenzscherdehnung Porenwasserüberdruck: $\gamma_{tü} = 1{,}33 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma^{2/3} \cdot (1 - \frac{\Delta u}{\sigma})^{2/3}$

(TRIANTAFYLLIDIS 1998)

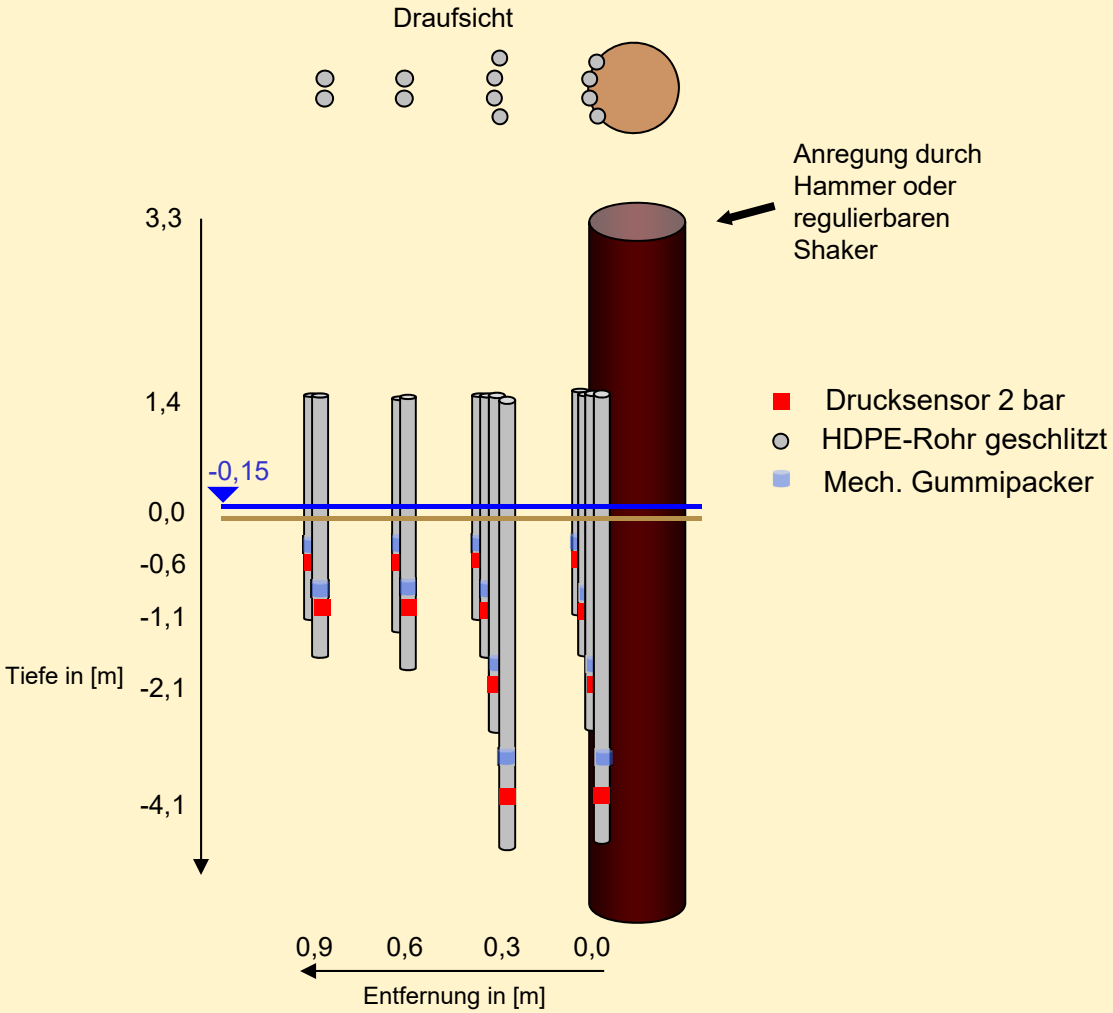


v = Partikelgeschwindigkeit → Frequenz, Amplitude

Δu = Porenwasserüberdruck

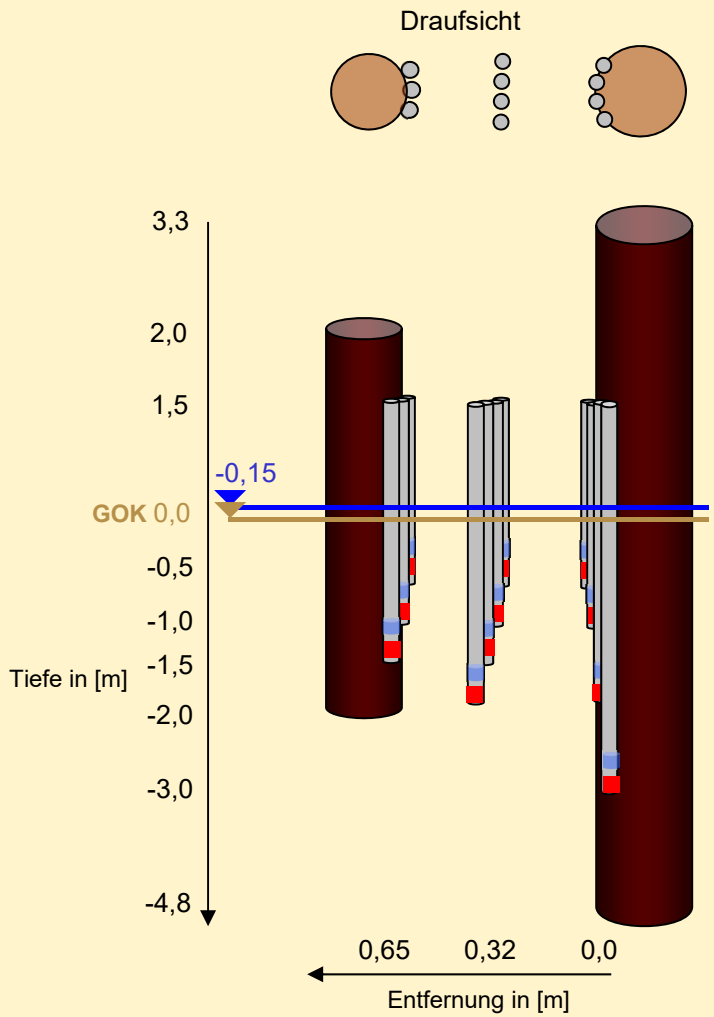
Versuchseinrichtung zur Erfassung von Porenwasserdruck

Versuchsaufbau I



Versuchseinrichtung zur Erfassung von Porenwasserdruck

Versuchsaufbau II

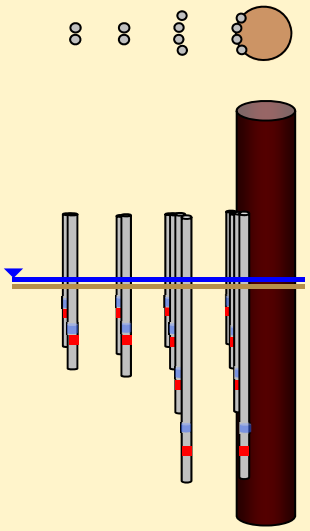


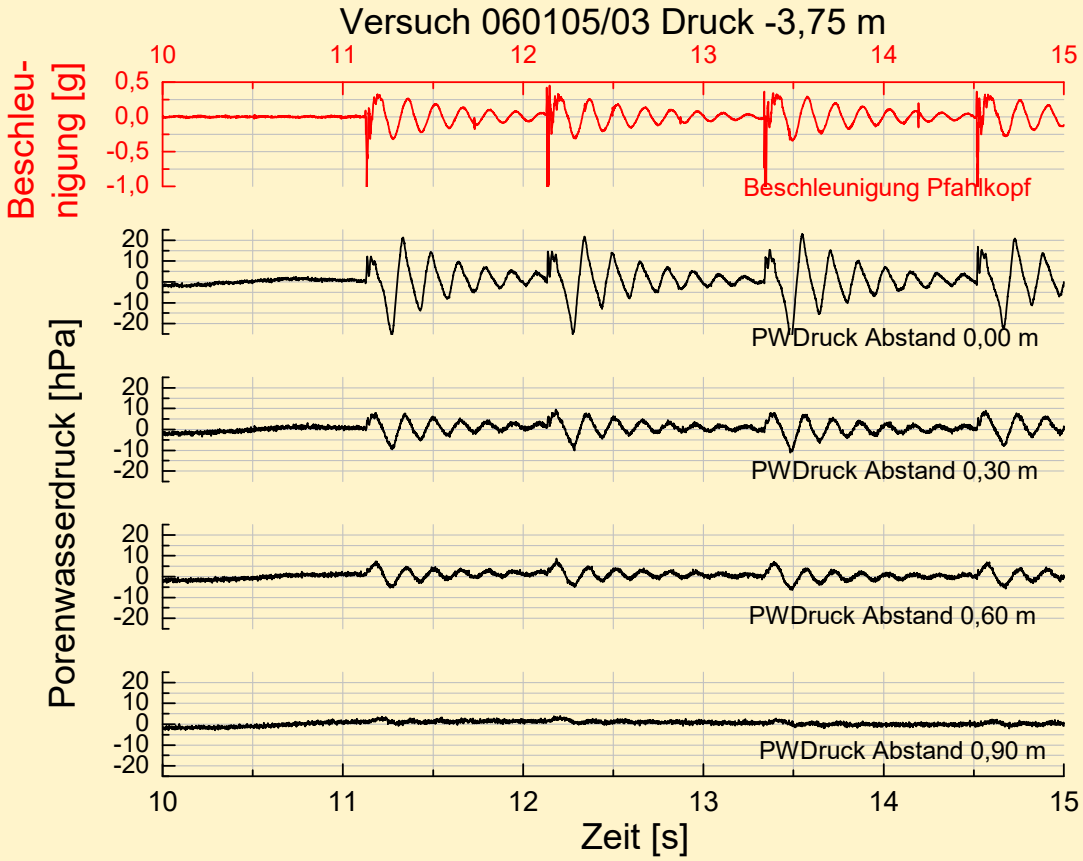
Versuchseinrichtung zur Erfassung von Porenwasserdruck

Versuchsaufbau

Erfassung von Porenwasserdruck infolge Pfahlschwingungen

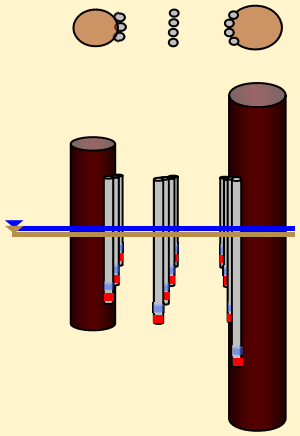
Messergebnisse

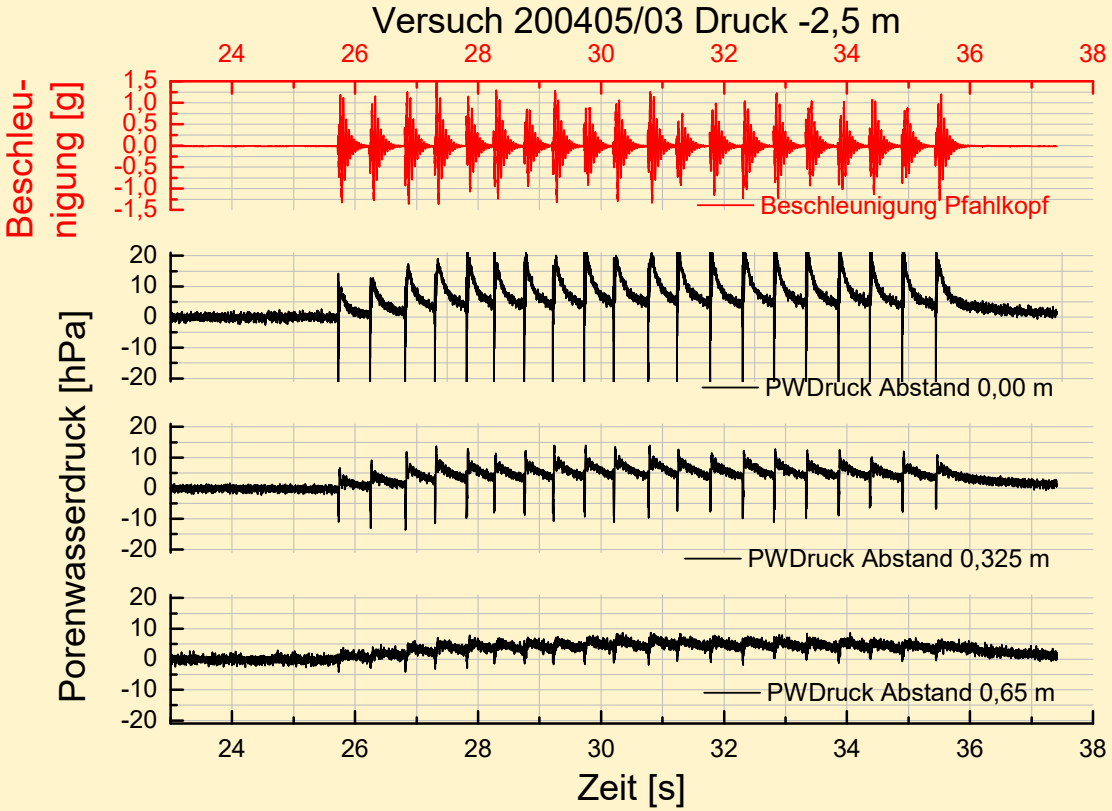




Erfassung von Porenwasserdruck infolge Pfahlschwingungen

Messergebnisse

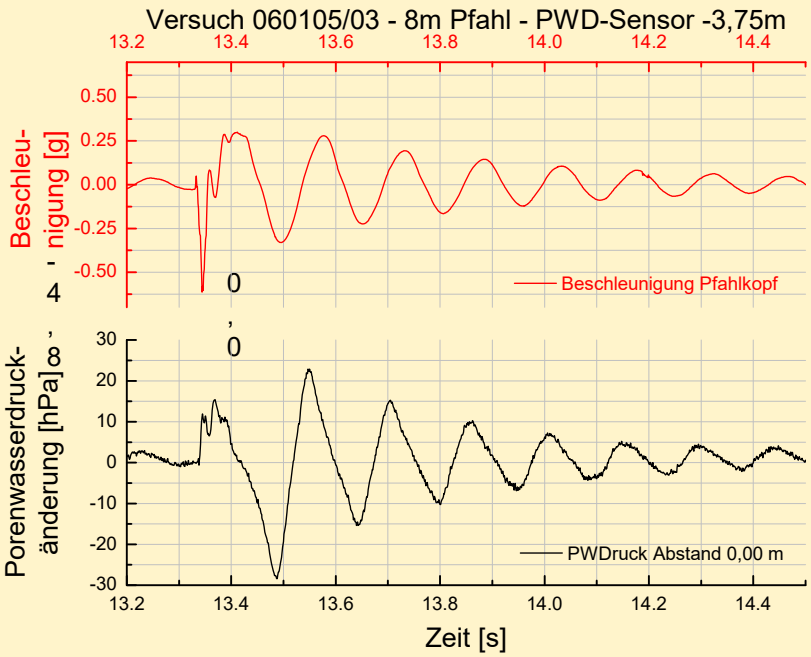




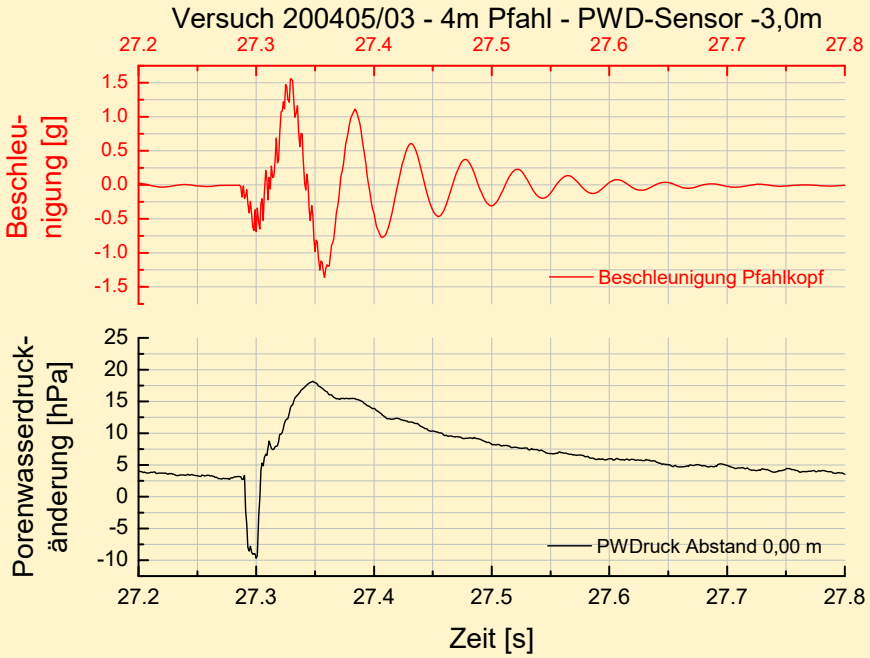
Erfassung von Porenwasserdruck infolge Pfahlschwingungen

Messergebnisse

PWD – Schwingung – 7 Hz

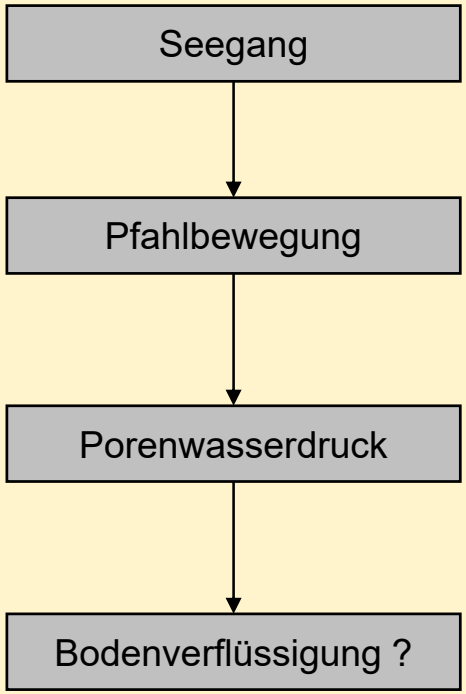


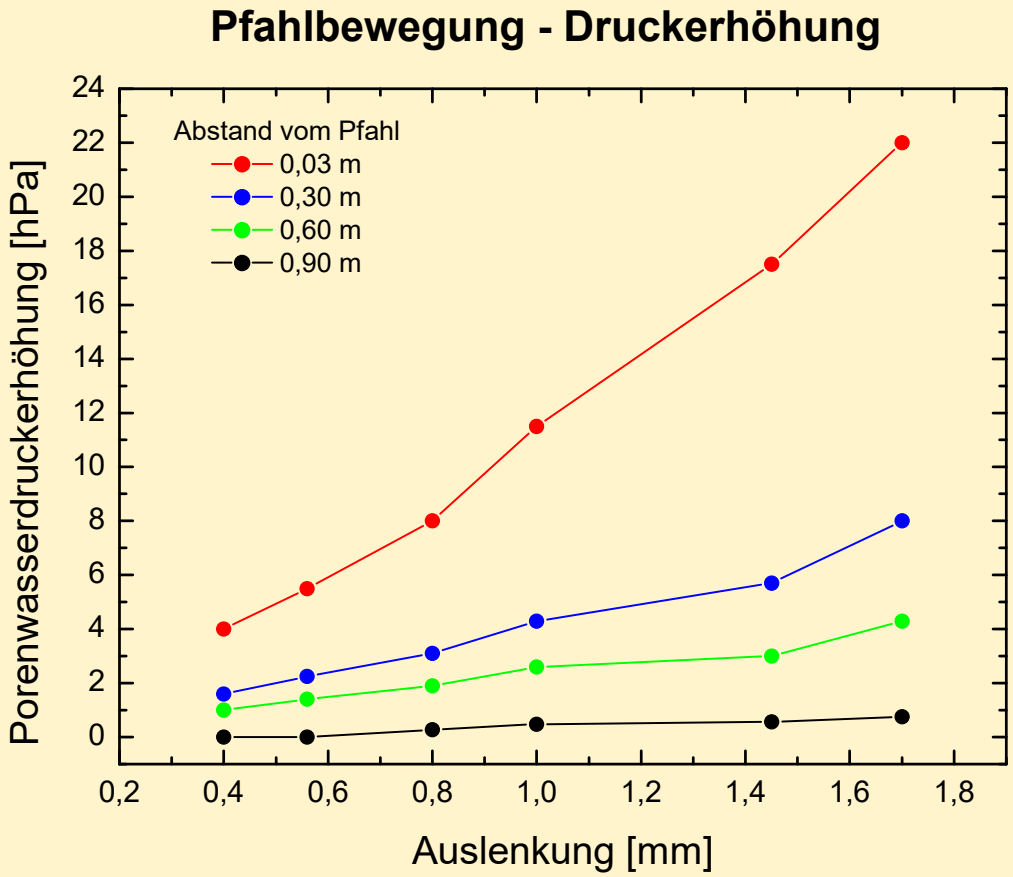
PW – Druckerhöhung – 20 Hz



Erfassung von Porenwasserdruck infolge Pfahlschwingungen

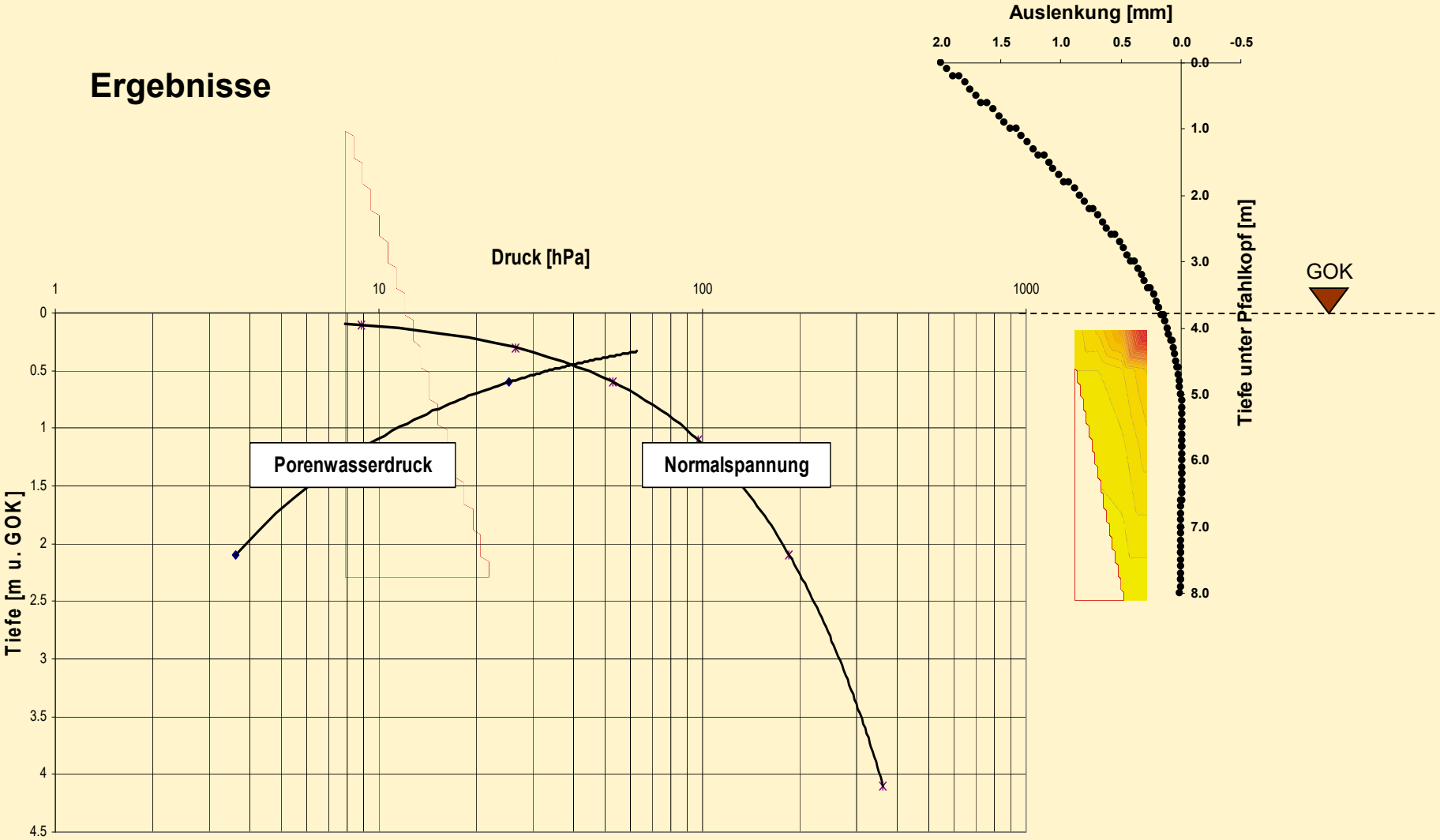
Ergebnisse





Erfassung von Porenwasserdruck infolge Pfahlschwingungen

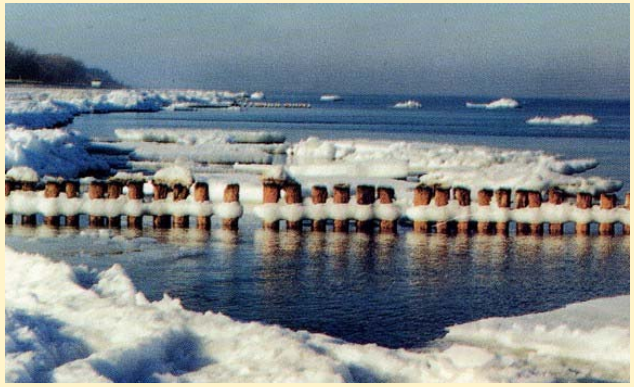
Ergebnisse

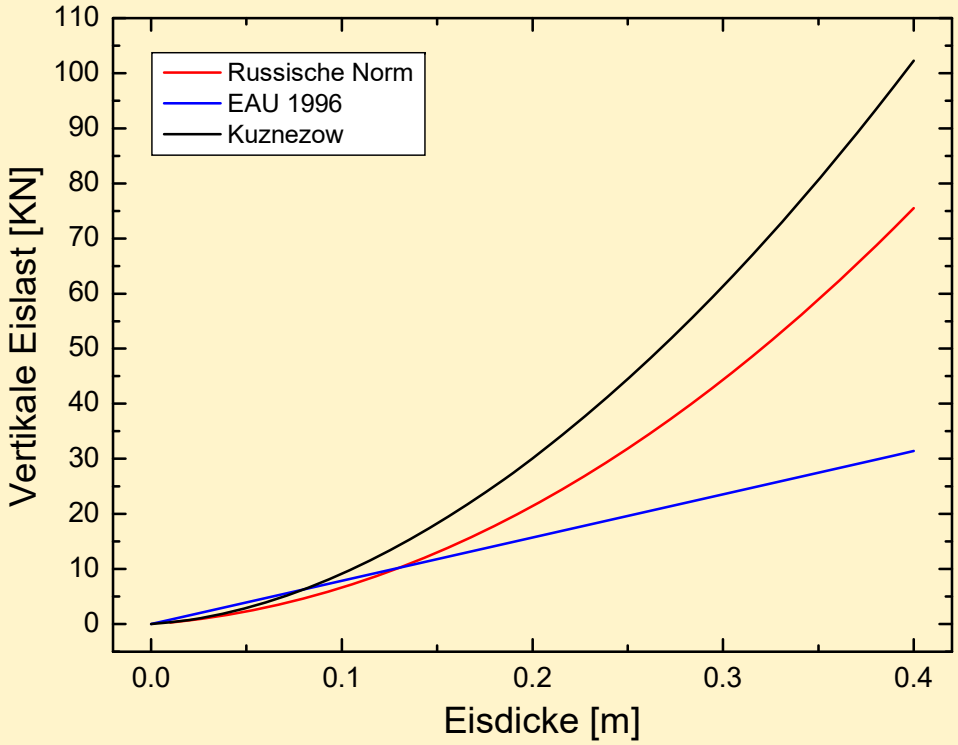


Versuchseinrichtung zur Erfassung von Porenwasserdruck

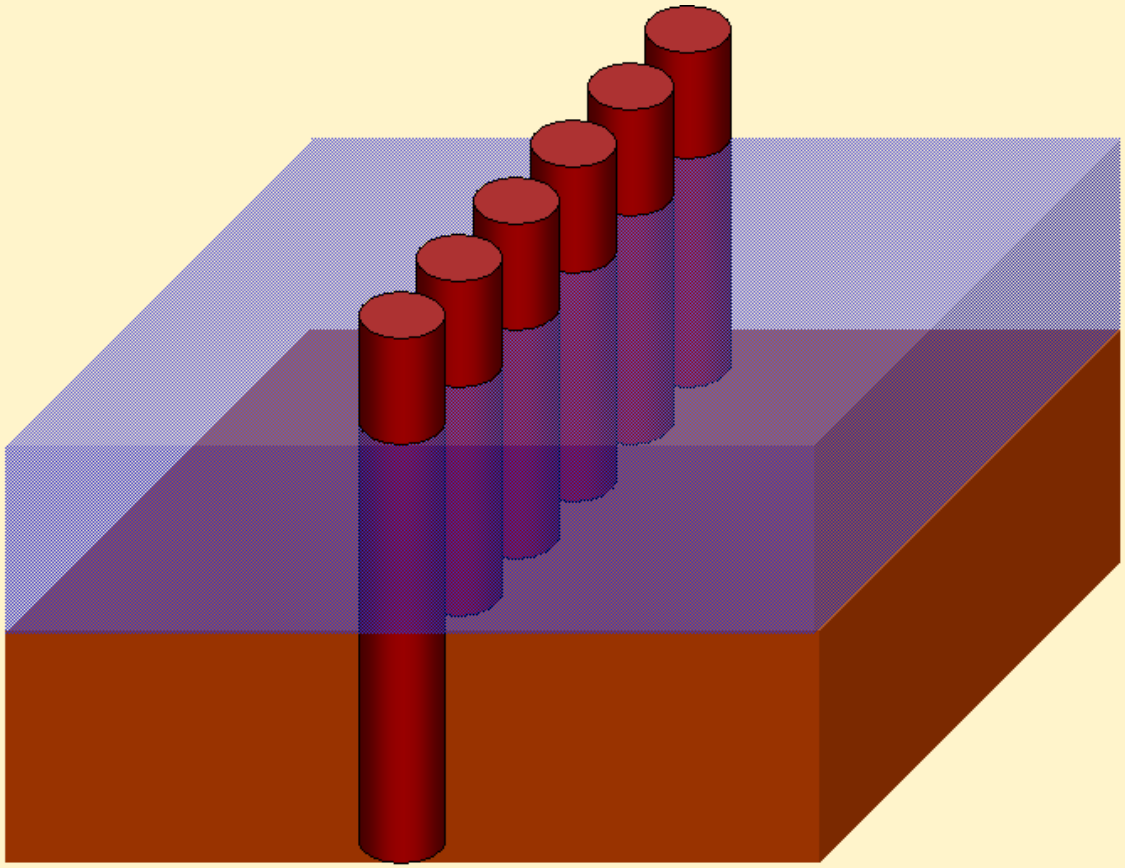
Versucheinrichtung Winter 2004 / 2005

Vertikale Eislasten

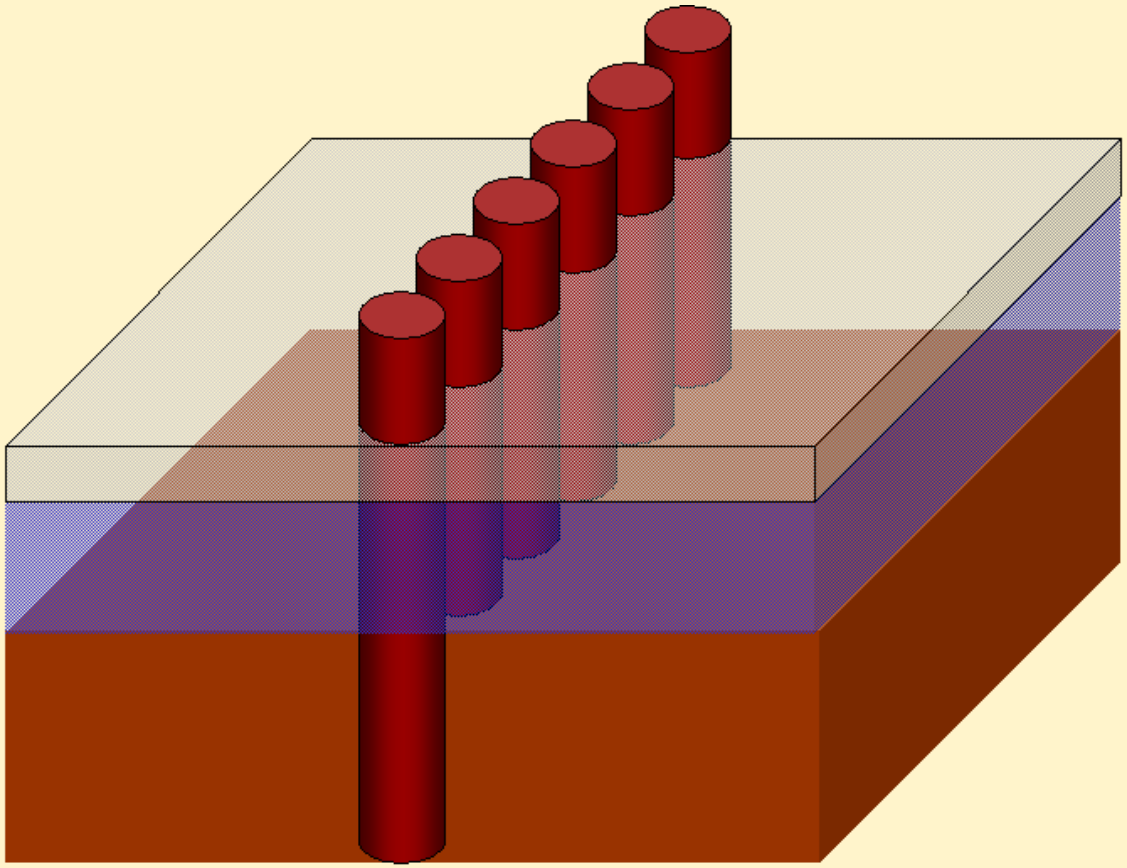




Vertikale Eislasten - Versagensmechanismus

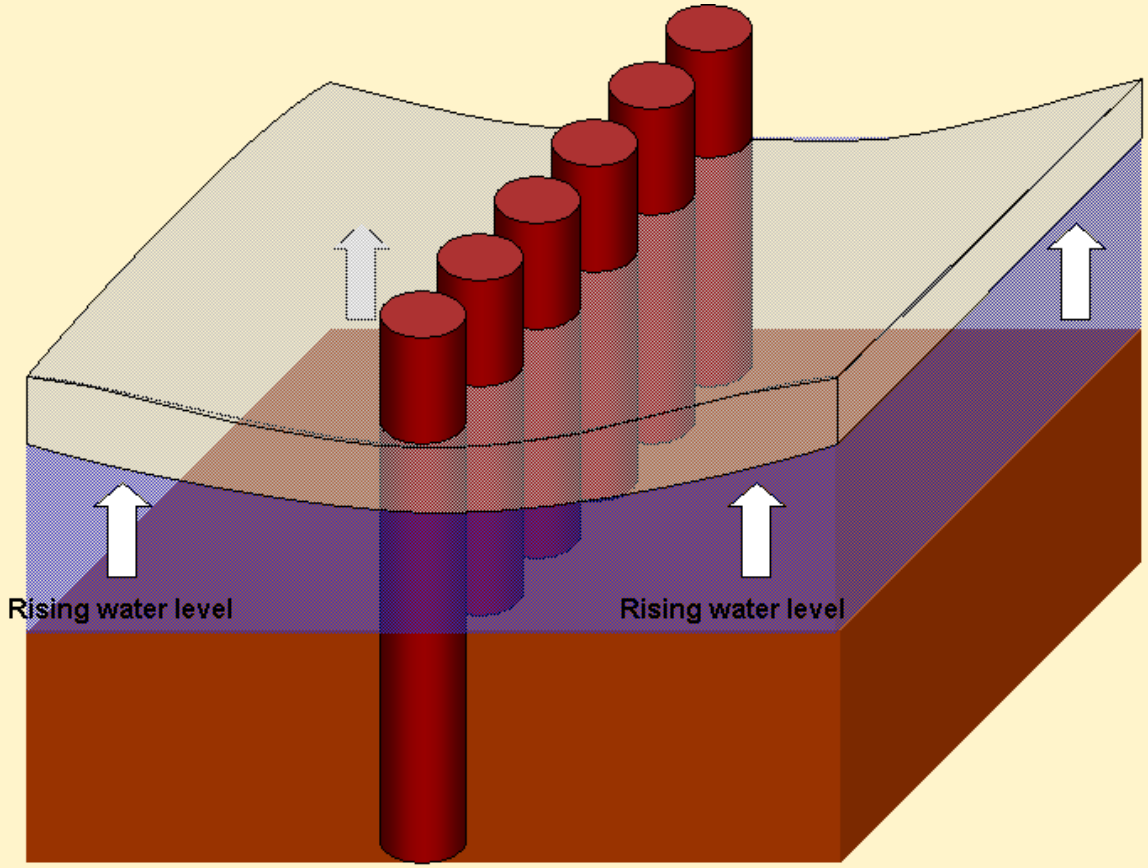


Vertikale Eislasten - Versagensmechanismus

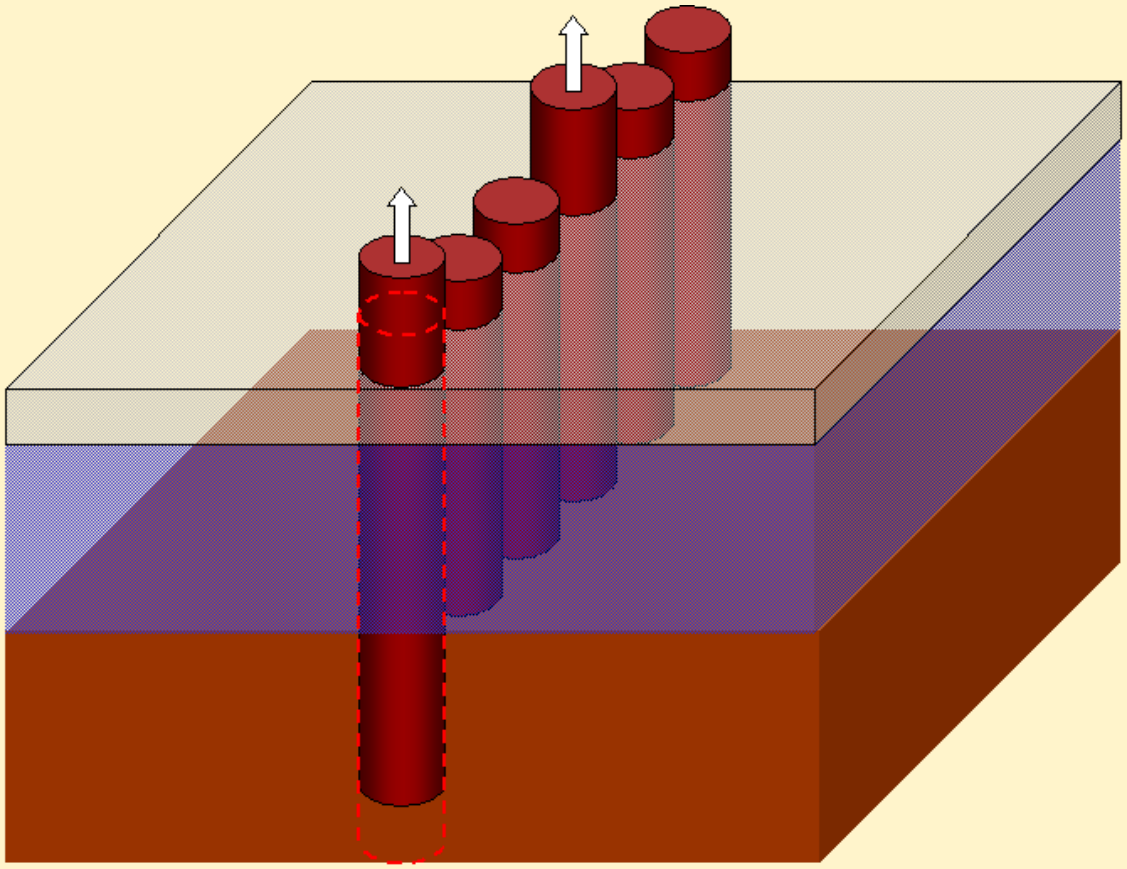


1

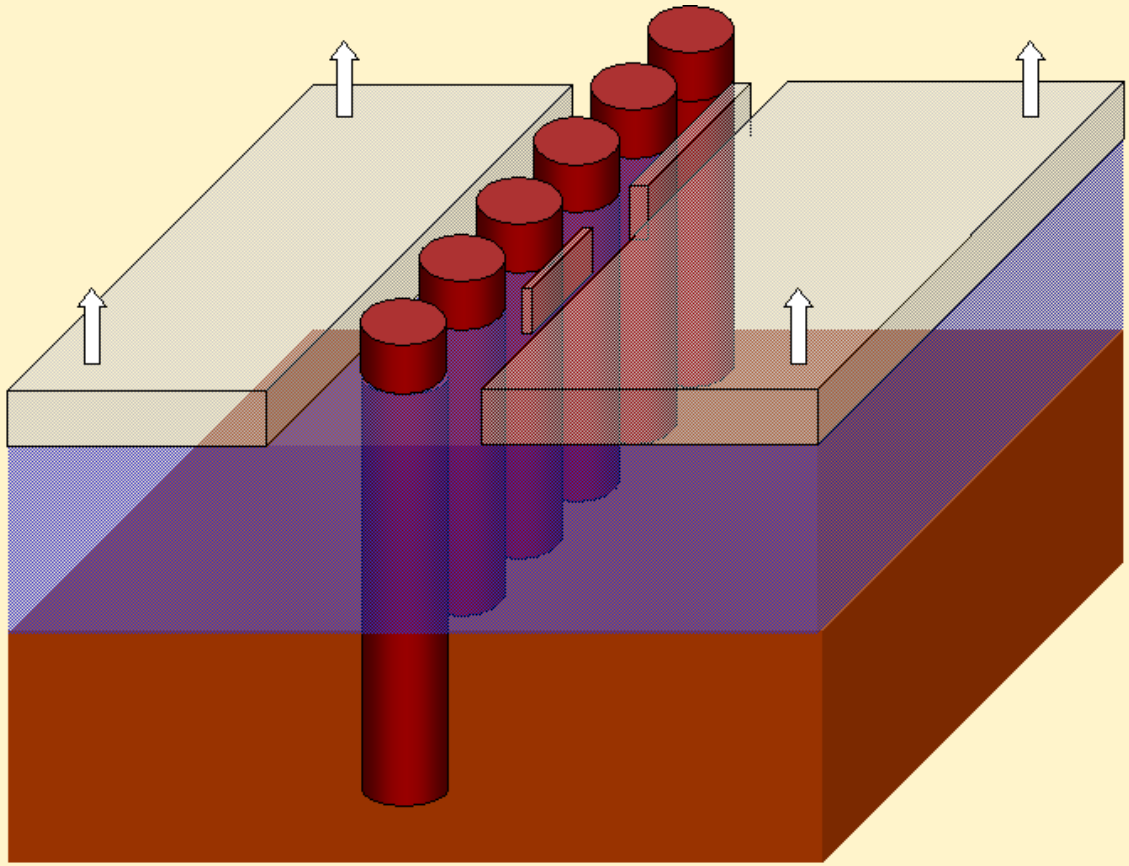
Vertikale Eislasten - Versagensmechanismus



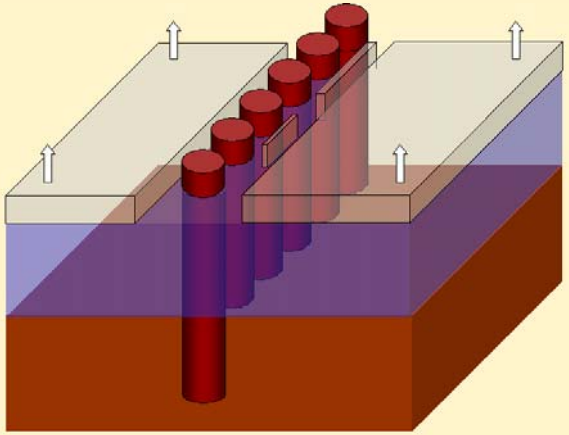
Vertikale Eislasten - Versagensmechanismus

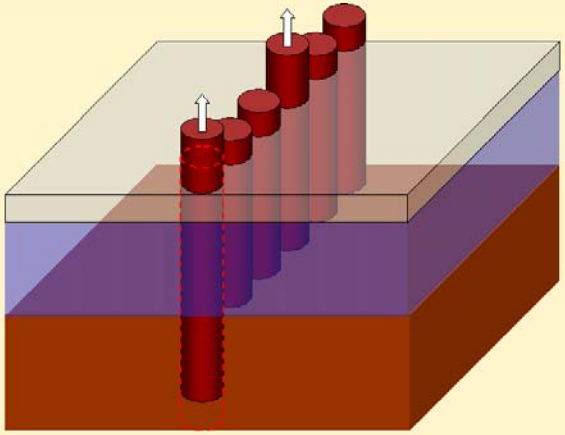


Vertikale Eislasten - Versagensmechanismus



Vertikale Eislasten - Untersuchungsprogramm





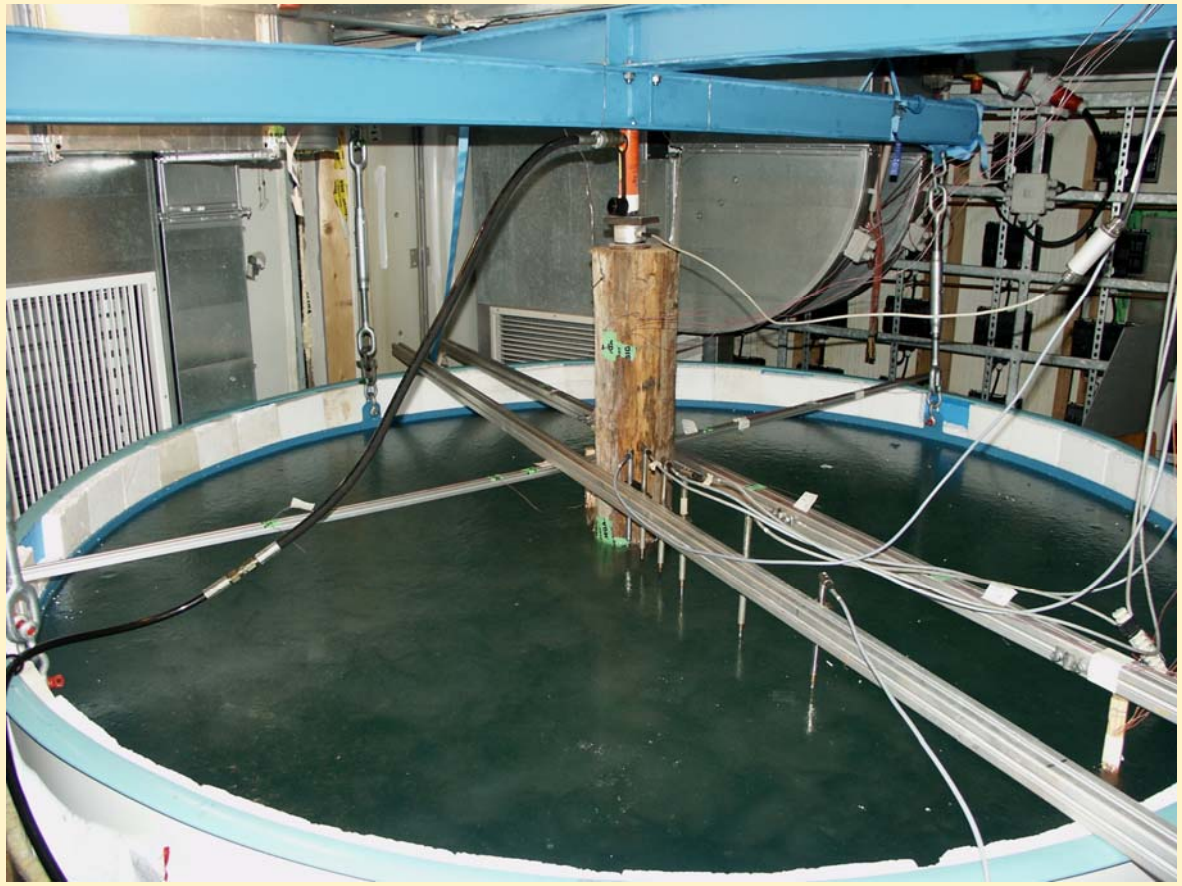
Versagen des Eises ⇨ Vertikale Eiskräfte

Versagen des Pfahls ⇨ Haltekräfte

Vertikale Eislasten - Laborversuche

Versuchsaufbau

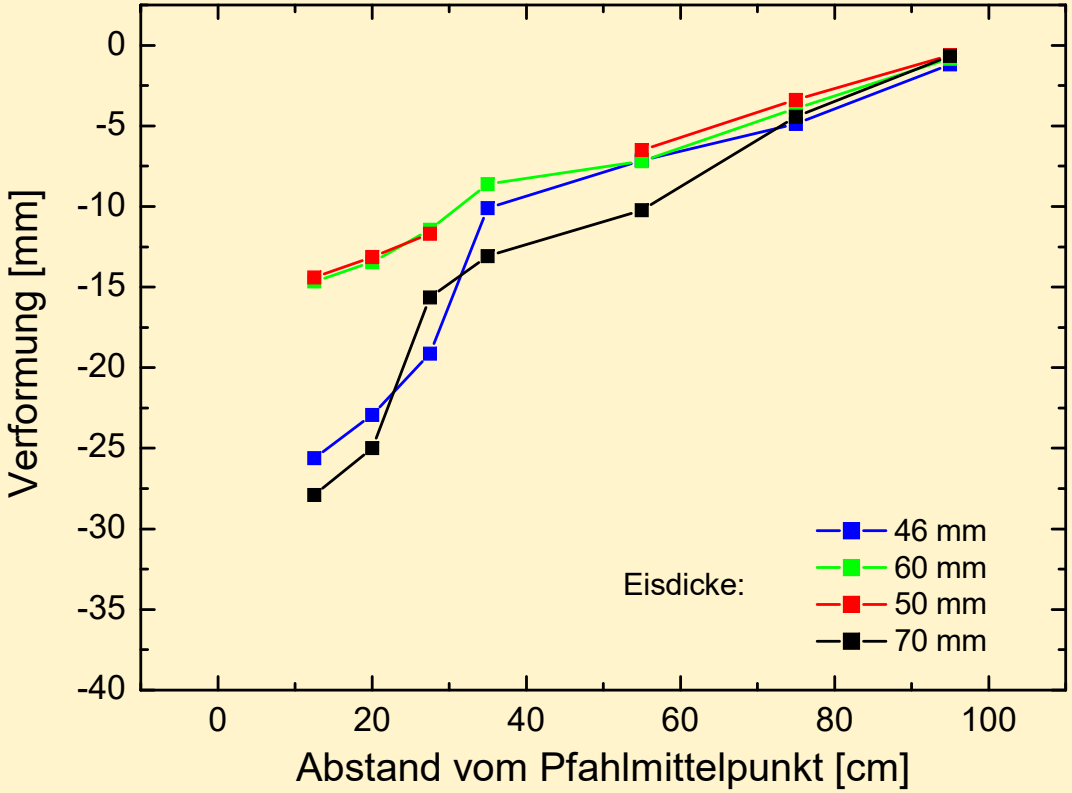
- Becken ∅ 2,5 m
- Wassertiefe 0,80 m
- Pfahldurchmesser 0,23 m
- 1 Kraftmessdose
- 8 Wegaufnehmer
- 28 Temperaturfühler (Luft, Wasser, Eis)



Vertikale Eislasten: Laborversuche

Ergebnisse

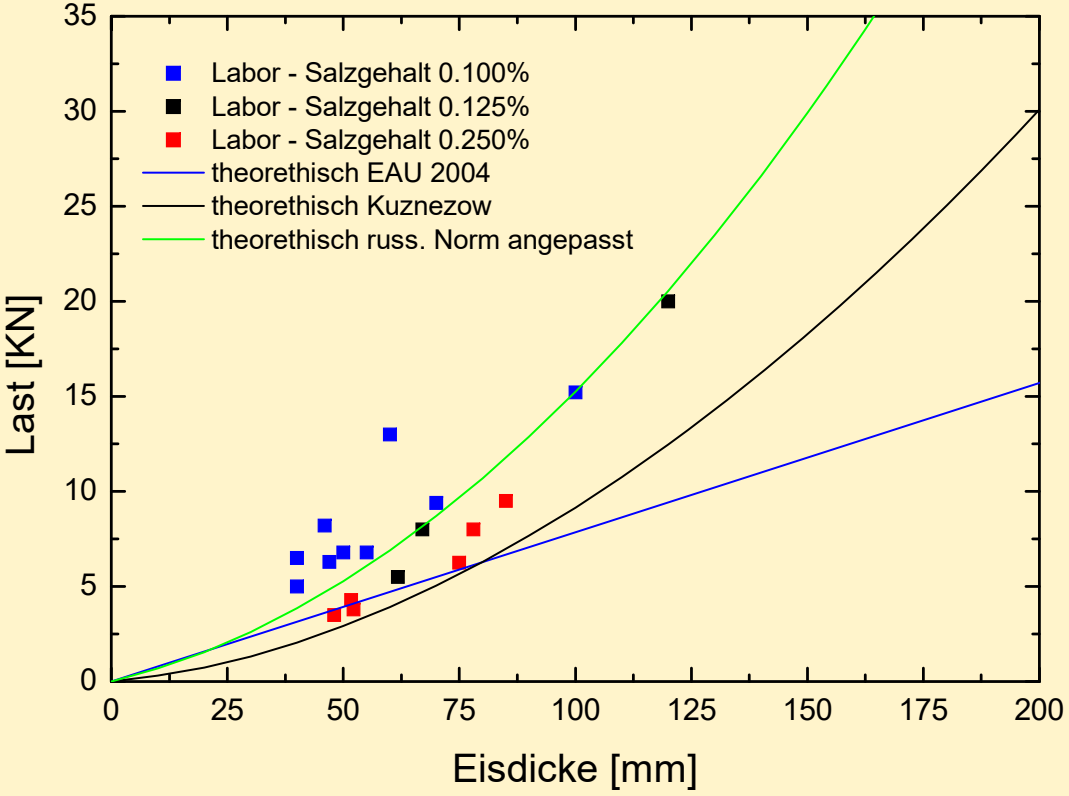
- Versagen durch Überschreiten der Biegezugfestigkeit des Eises
- Versagen beginnt auf der Unterseite des Eises (0° C)



Vertikale Eislasten: Laborversuche

Ergebnisse

- Versagen durch Überschreiten der Biegezugfestigkeit des Eises
- Versagen beginnt auf der Unterseite des Eises (0° C)
- Berechnung nach EAU liefert zu geringe Eislasten
- Bemessung nach russischer Norm von 1995 - Anpassung



Haltende Kräfte - Zugversuche

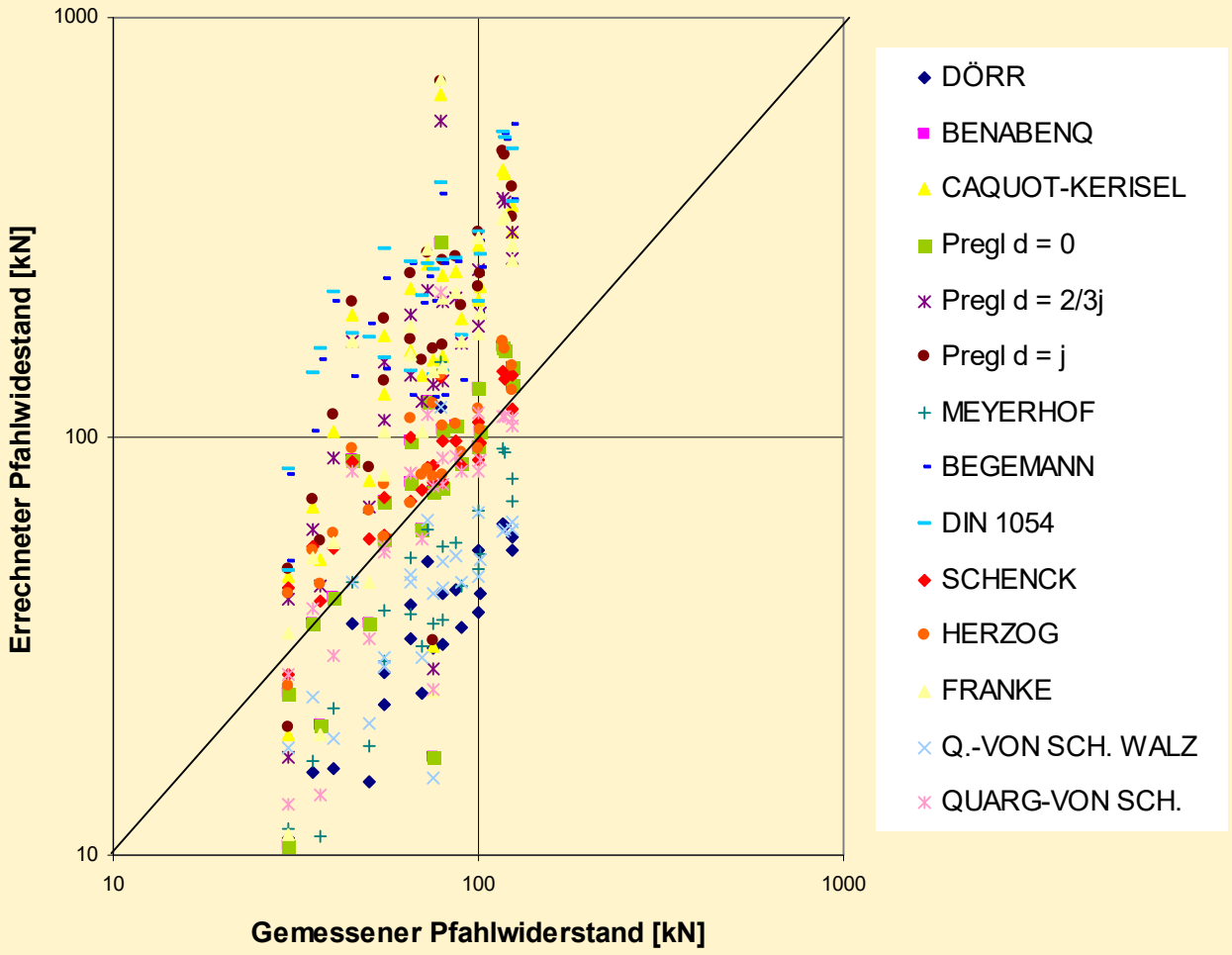
Versuchsdurchführung

- 50 Zugversuche an der Küste MV`s (2 Diplomarbeiten)
- 27 Testpfähle
- verschiedene Baugrundtypen und Rammtiefen
- Zugbelastungen bis max. 120 KN realisiert

Haltende Kräfte - Zugversuche

Ergebnisse

- Bemessung nach empirischen Ansätzen je nach Baugrund
- Hilfestellung durch automatisierte Baugrundkarte (Darstellung, Rechenwerte)



Zusammenfassung

Seegangsinduzierte Pfahlschwingungen

- **Bewegungsverhalten von Buhnenpfählen kann als Funktion von Seegang, Wasserstand, Pfahllänge und Position des Pfahles in der Buhne beschrieben werden**
- **Übertragungsfunktion Pfahlbewegung – Porenwasserdruck wurde erarbeitet / Bodenverflüssigungseffekte treten bis ca. 0,5m Einbindetiefe auf**
- **Nachweis der erdstatischen und inneren Tragfähigkeit nach Standardverfahren (Wellenlasten, Strömung)**

Dimensionierung der Einspannlänge von Buhnenpfählen für den Lastfall seegangsinduzierte Pfahlschwingungen

Vertikale Eislasten

- **Vertikale Eislasten können in Abhängigkeit von Eisdicke,Standort und Position des Pfahles in der Buhne berechnet werden (Labor, Eisstatistik, Wasserstandsstatistik, Modellrechnungen)**
- **Haltende Kräfte werden mit empirischen Ansätzen bestimmt**
  Grundlage: Zugversuche, Baugrunduntersuchungen CPT, Integritätstests

Dimensionierung der Einspannlänge von Buhnenpfählen für den Lastfall Eis

Notwendige Einspannlänge von Buhnenpfählen

Praktischer Bemessungsansatz

Beanspruchung und Bemessung von Holzpfählen im Küstenwasserbau

BMBF/KFKI-Forschungsvorhaben 03KIS023

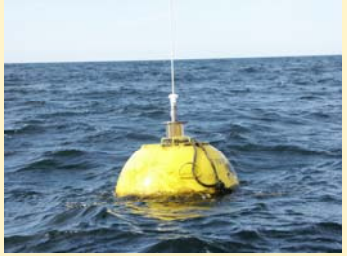
2001-2005

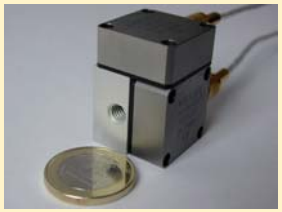
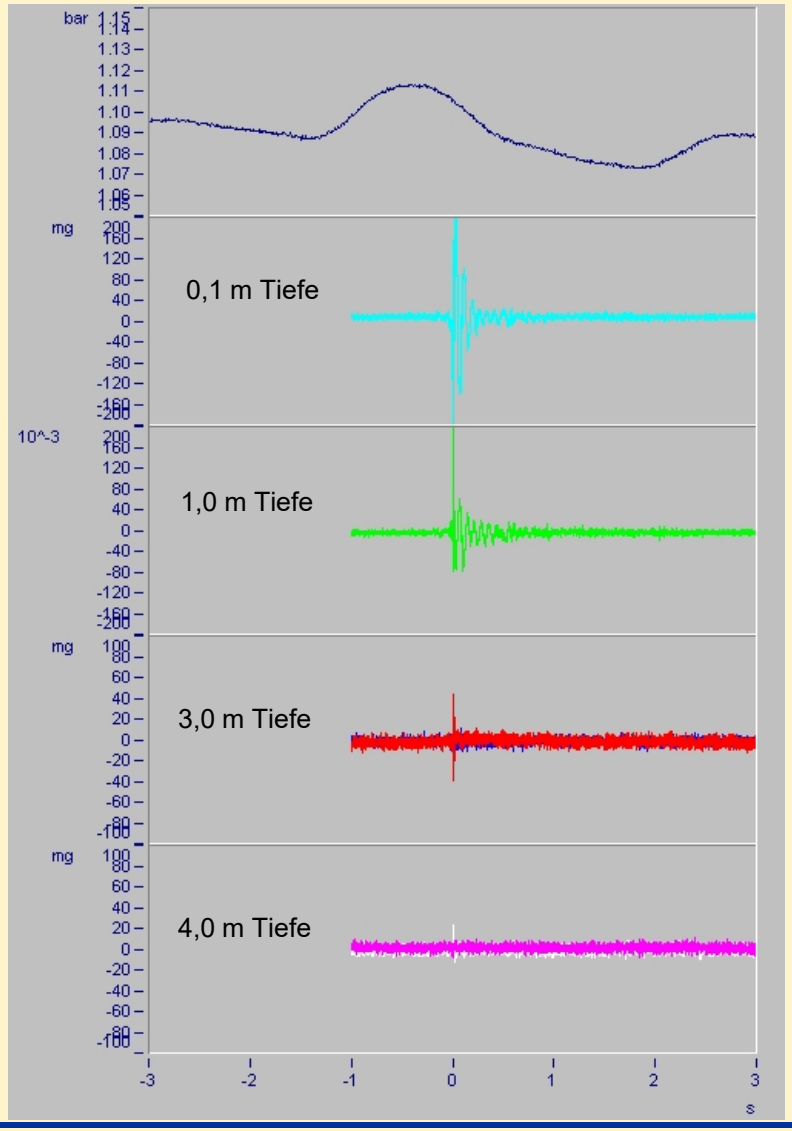
Universität Rostock in Kooperation mit dem Staatlichen Amt für Umwelt und Natur Rostock

Vielen Dank !

Seegang und seegangsinduzierte Pfahlbewegungen

- Seegangsdaten Dir. Waverider: H_{mo} = 0,68 m
  T_{02} = 3,28 s
  Θ = 293°



- Druckmessdose

- Beschleunigungssensoren