

# Anwendung innovativer Stoffmodelle für Böden im Rahmen von F&E-Projekten in der Praxis

*Dr.-Ing. Thomas Meier,  
BAUGRUND DRESDEN Ingenieurgesellschaft mbH*

# Inhaltsübersicht

- Hypoplastizität – Entmystifizierung
- Entwicklung eines Mikropfahl-Tiefgründungssystems
- Numerische Bestimmung eines „Magnitude Scaling Factors“
- Weitere Projekte

## Hypoplastizität – Entmystifizierung

Stoffmodell = mathematische Beschreibung des mechanischen Verhaltens von Böden

Hypoplastizität mit Intergranularer Dehnung (granulare Böden)

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}}' = \mathbf{M}(\boldsymbol{\sigma}', e, \boldsymbol{\delta}, \dot{\boldsymbol{\varepsilon}})$$

[v. Wolfferdorff, 1997]

[Niemunis & Herle, 1997]

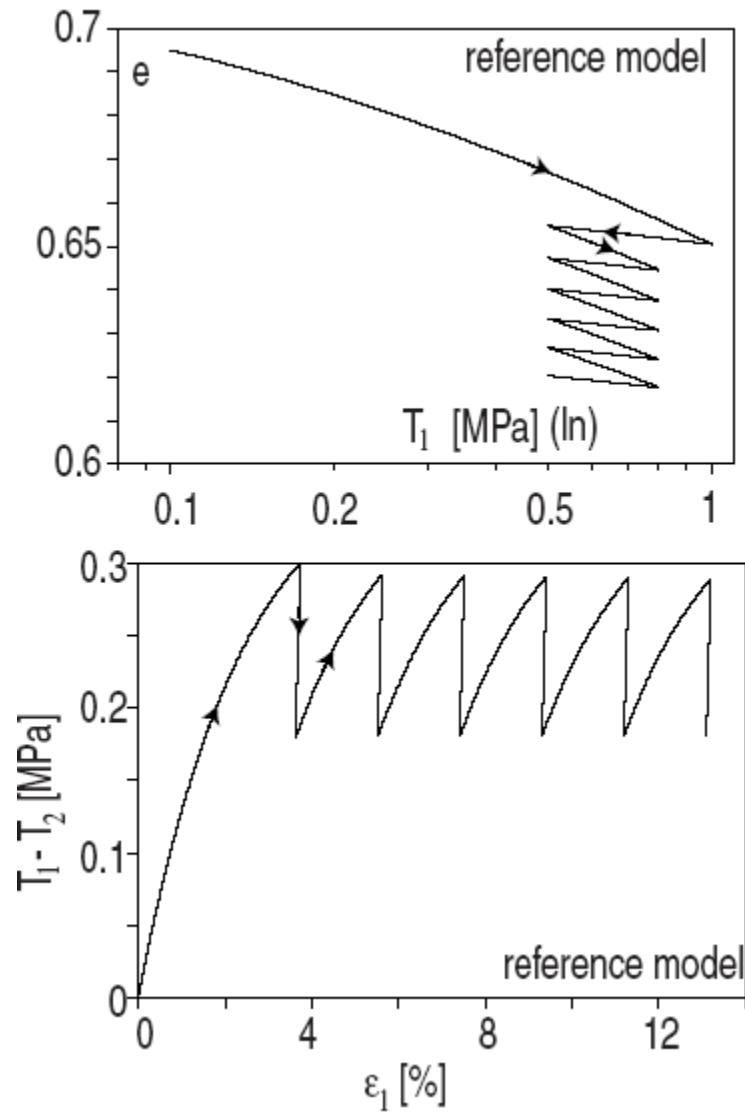
8 Materialparameter:

$\varphi_c$  – kritischer Reibungswinkel

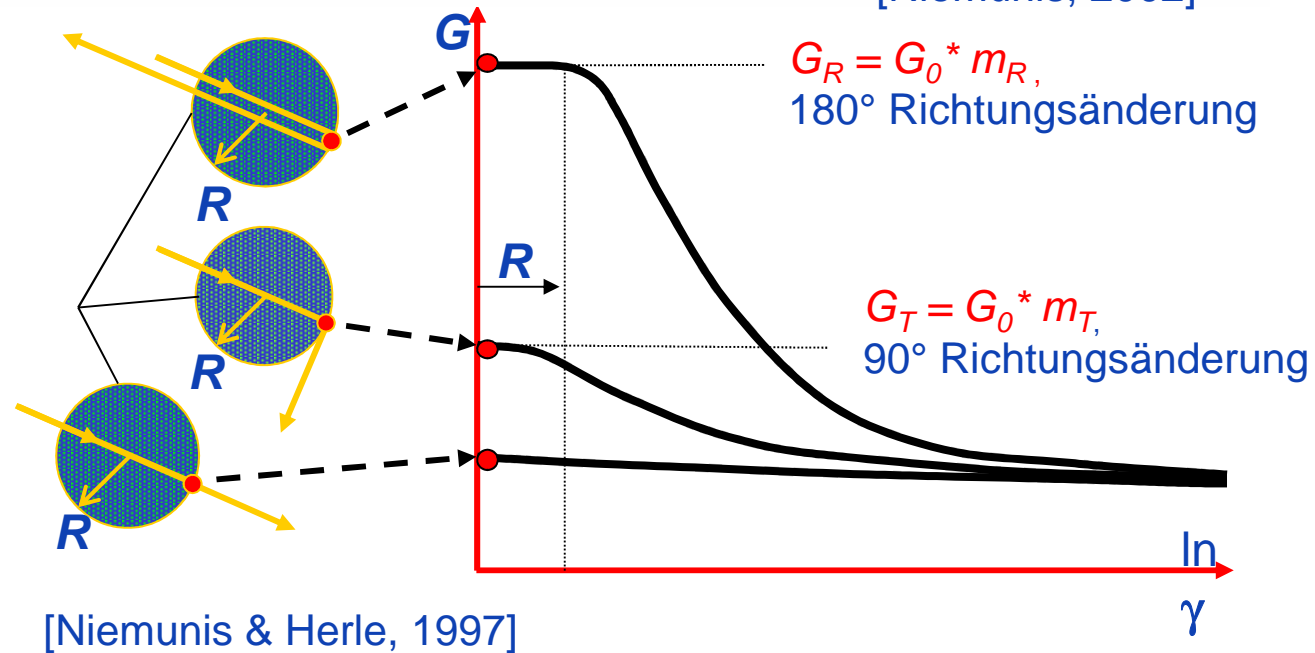
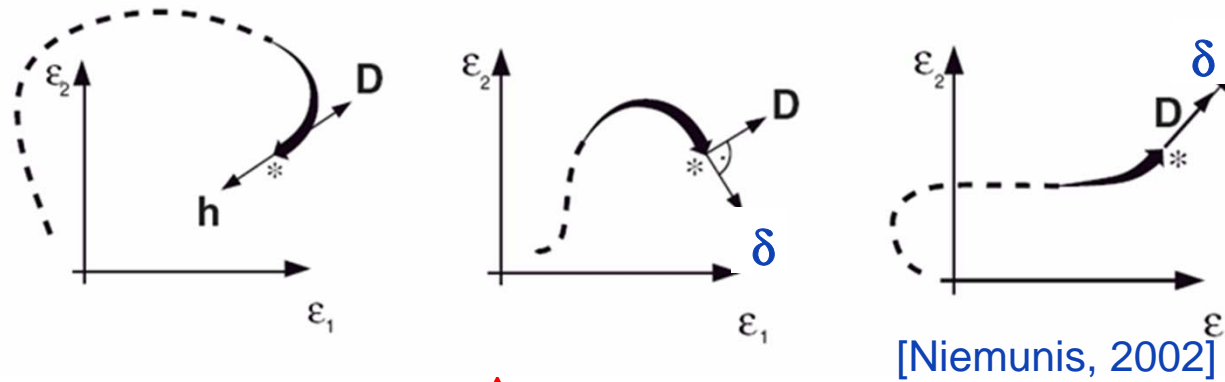
$h_s, n$  – Granulathärte  $h_s$  und Exponent  $n$

$e_{d0}, e_{c0}, e_{i0}$  – Grenzporozahlen bei Druck Null

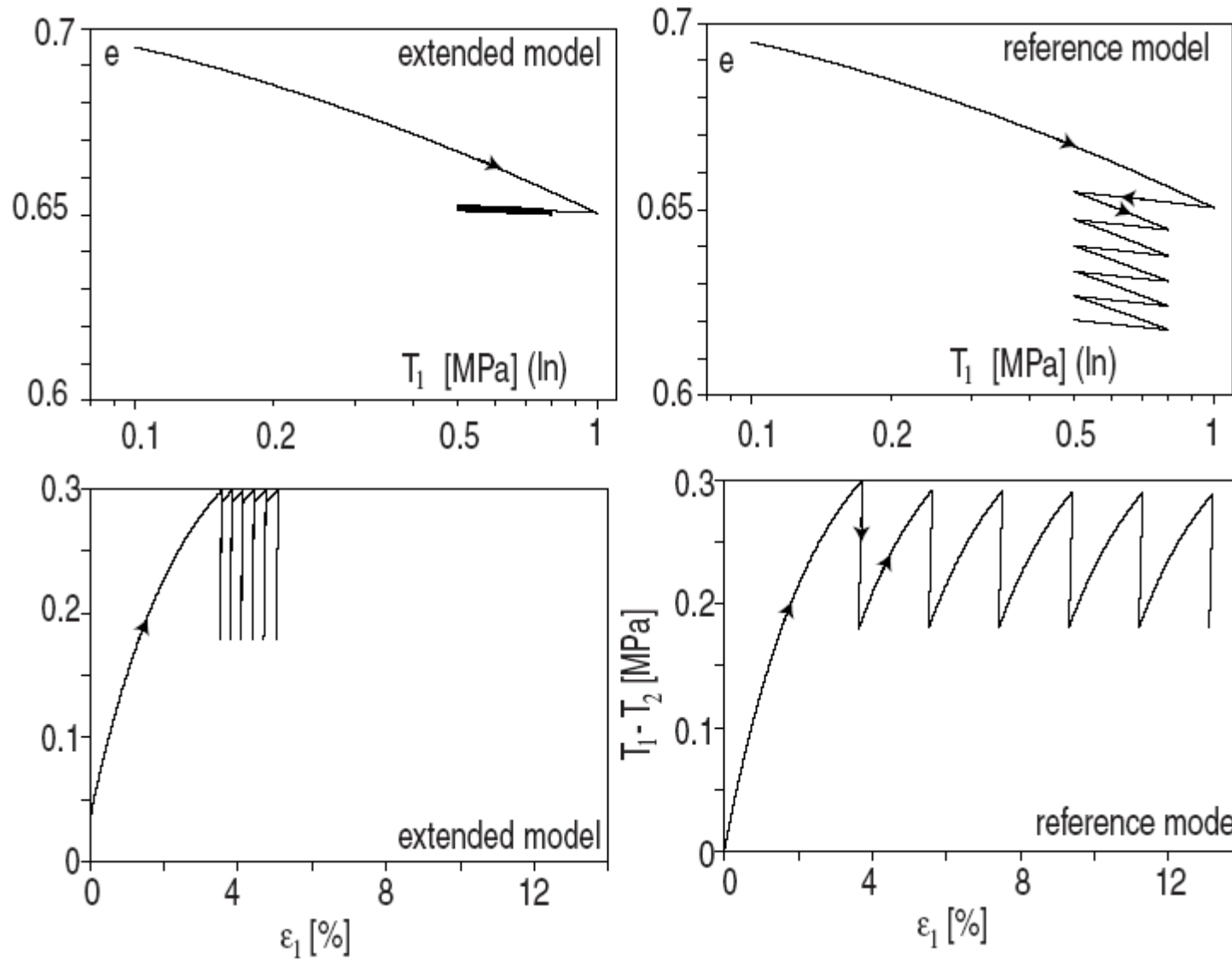
$\alpha, \beta$  – Exponenten



[Niemunis, 2002]



+ 5 Parameter für die Intergranulare Dehnung



# Inhaltsübersicht

- Hypoplastizität – Entmystifizierung
- **Entwicklung eines Mikropfahl-Tiefgründungssystems**
- Numerische Bestimmung eines „Magnitude Scaling Factors“
- Weitere Projekte

# Entwicklung eines Mikro-Pfahl-tiefgründungssystems für durch Erdbeben verflüssigungsgefährdete Böden

## Verflüssigung



[University of Washington - <http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/what/what1.html>]



# Entwicklung eines Mikro-Pfahl-tiefgründungssystems für durch Erdbeben verflüssigungsgefährdete Böden

## Motivation



Niigata earthquake 1964, Quelle: [en.wikipedia.org](https://en.wikipedia.org)

# Entwicklung eines Mikro-Pfahl-tiefgründungssystems für durch Erdbeben verflüssigungsgefährdete Böden

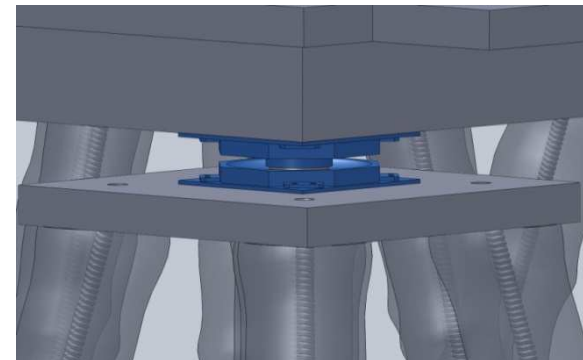
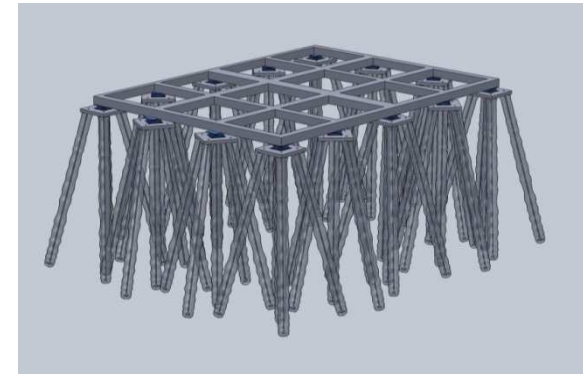
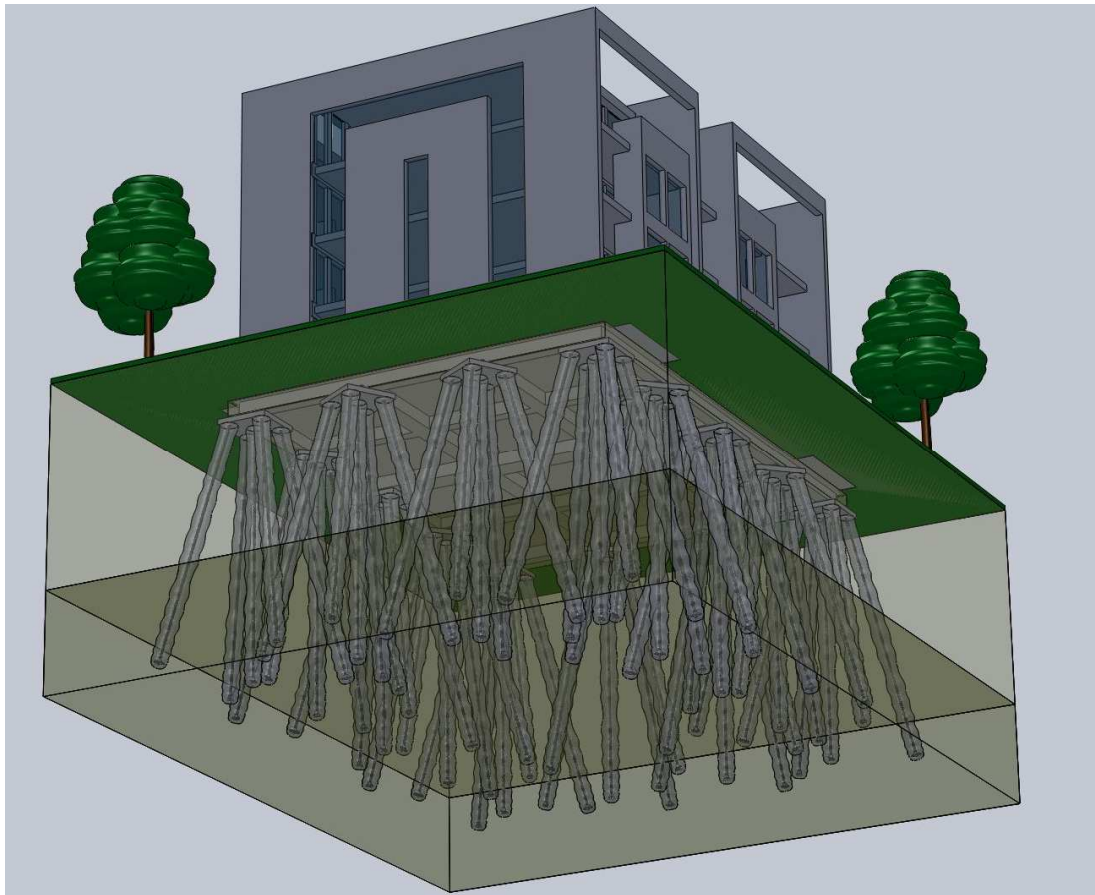
## Motivation



Aktueller Anlass: Christchurch, 2010/2011 Neuseeland,  
Quelle: [thewatchers.adorraeli.com](http://thewatchers.adorraeli.com)

# Entwicklung eines Mikro-Pfahl-Tiefgründungssystems für durch Erdbeben verflüssigungsgefährdete Böden

## Mögliche Lösung



25 JAHRE BAUGRUND DRESDEN, 03. MÄRZ 2016

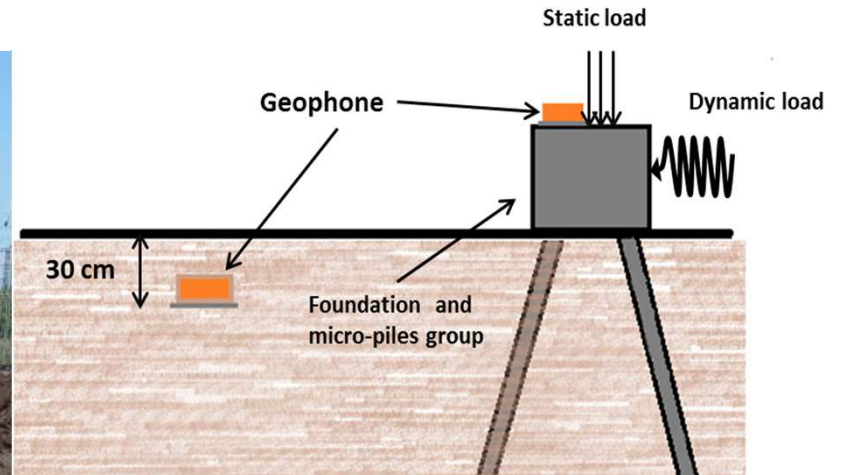
# Entwicklung eines Mikro-Pfahl-tiefgründungssystems für durch Erdbeben verflüssigungsgefährdete Böden

## Methodik:

- Originalmaßstäbliche Feldversuche (trocken)
- Numerische Simulation der Feldversuche
- Anwendung des validierten 3D-FE-Modells auf gesättigte Verhältnisse
- Entwicklung geeigneter Pfahlbocksysteme für standardisierte Gebäudetypen



# Feldversuche Klingersee – Tagebau Jänschwalde



Universität Kassel  
 Institut für Geotechnik und  
 Geohydraulik  
 Fachgebiet Geotechnik

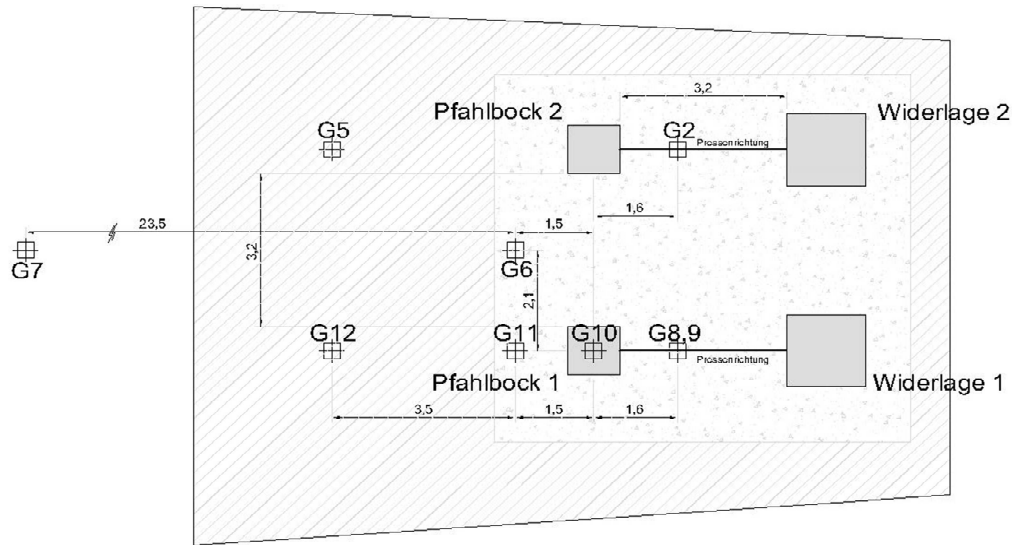


Hochschule für  
 Technik und Wirtschaft  
 Dresden  
 University of Applied Sciences

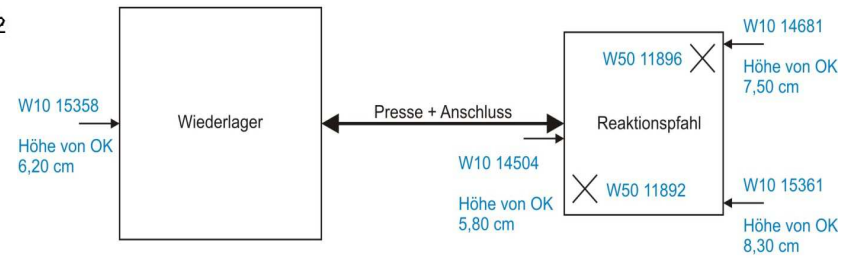
25 JAHRE BAUGRUND DRESDEN, 03. MÄRZ 2016



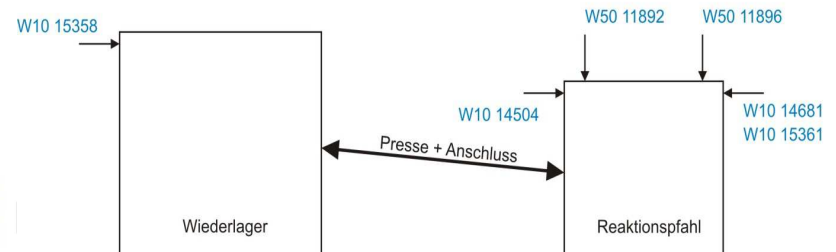
# Feldversuche Klingersee – Versuchseinrichtung



Draufsicht



Seitenansicht

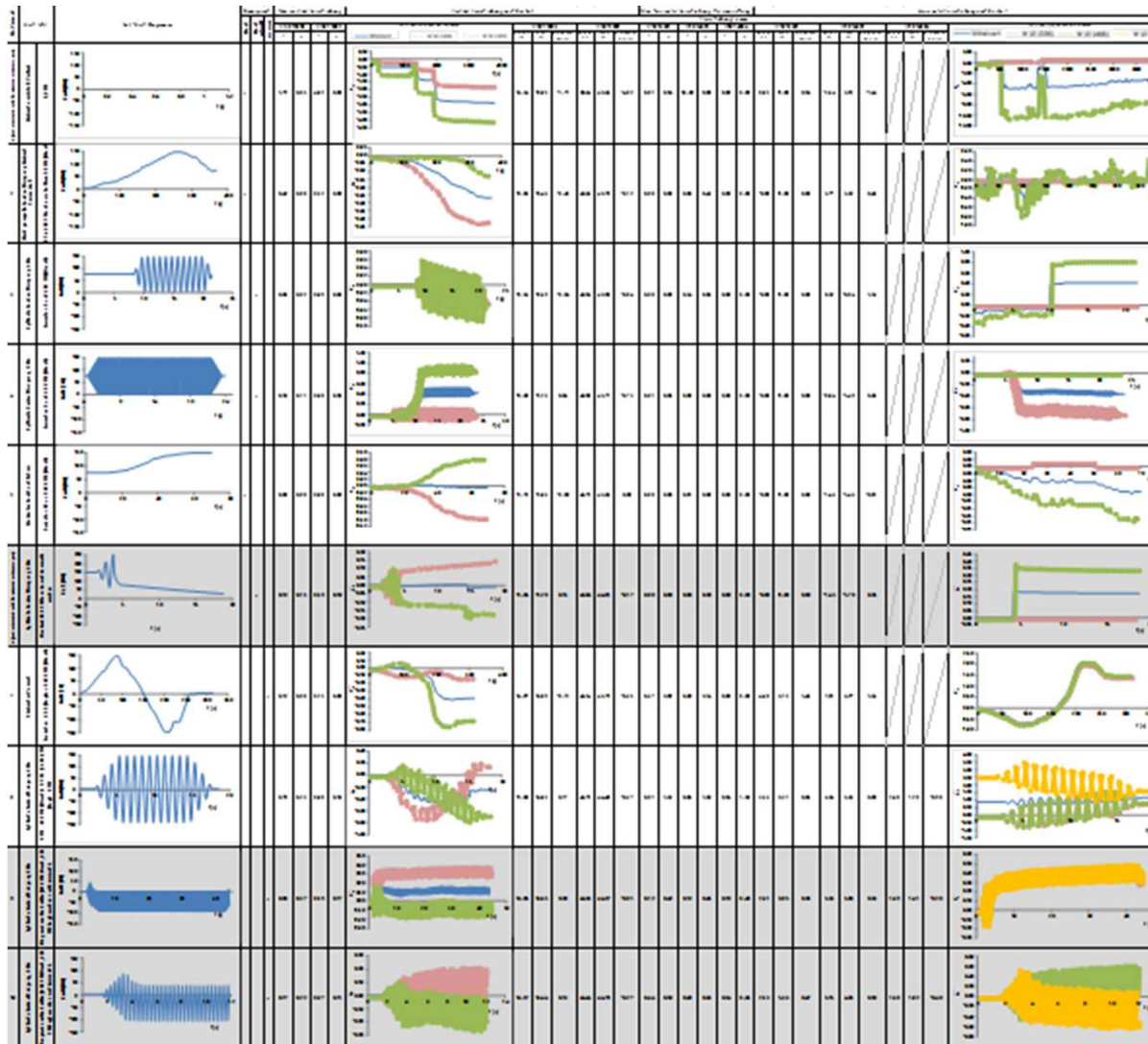


Geophon



[Meybodi, 2014]

# Feldversuche Klingersee – Ergebnisse

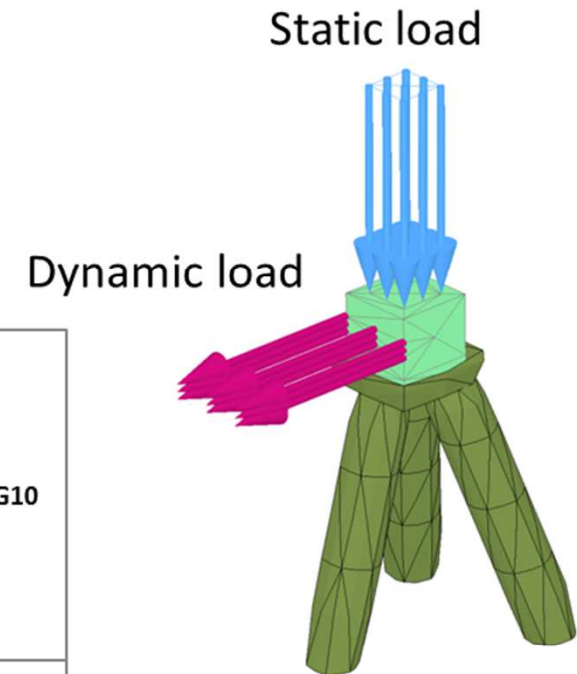
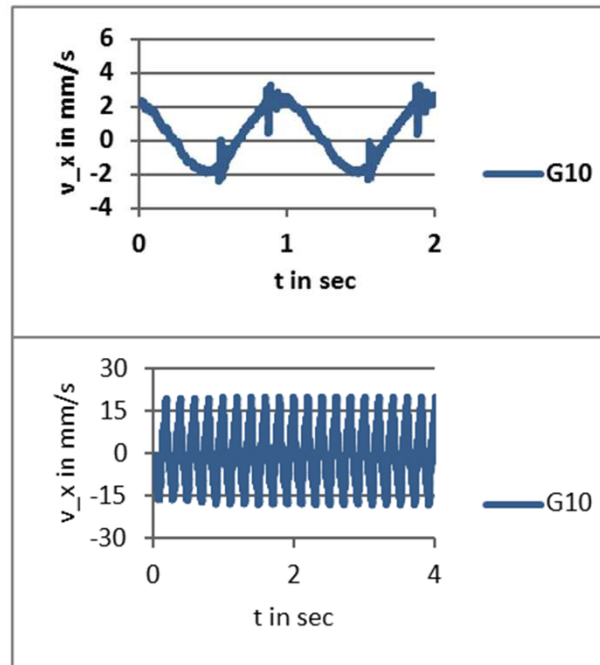
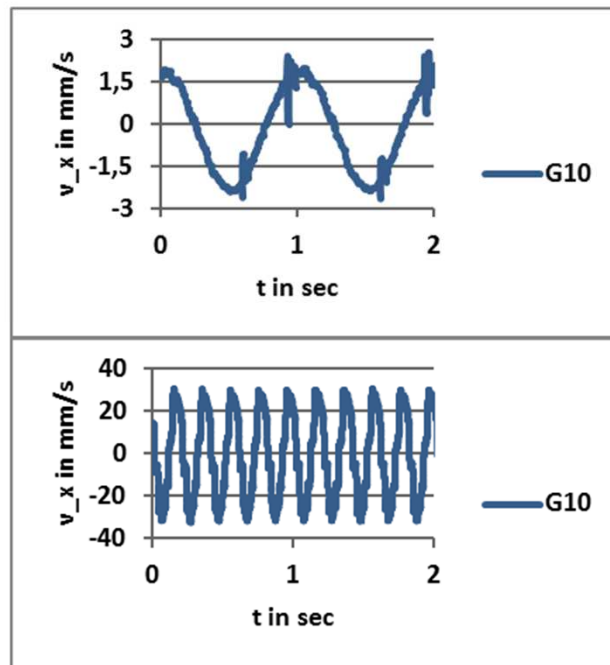


25 JAHRE BAUGRUND DRESDEN, 03. MÄRZ 2016



## Feldversuche Klingersee – Ergebnisse

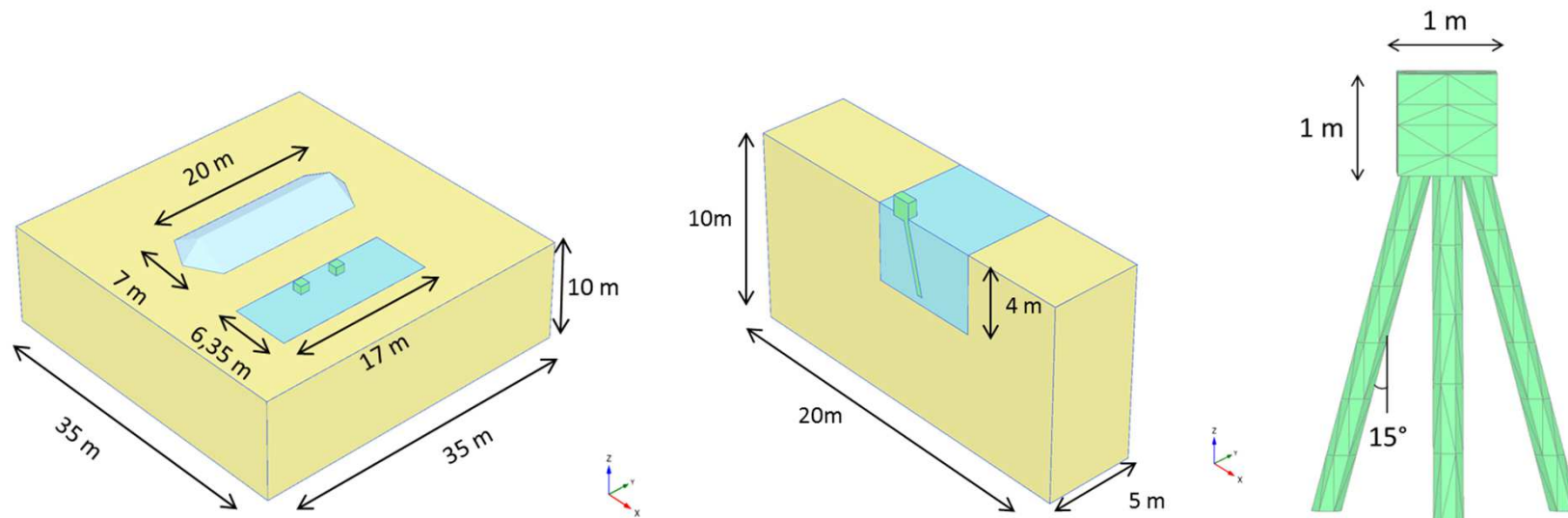
Dynamic phase	$v_{max}$ in mm/s	$f$ in Hz	Phase duration in sec
Lauf 1	2	1	2
Lauf 2	3	1	2
Lauf 4	30	5	2
Lauf 9	20	5	4



[Meybodi, 2014]



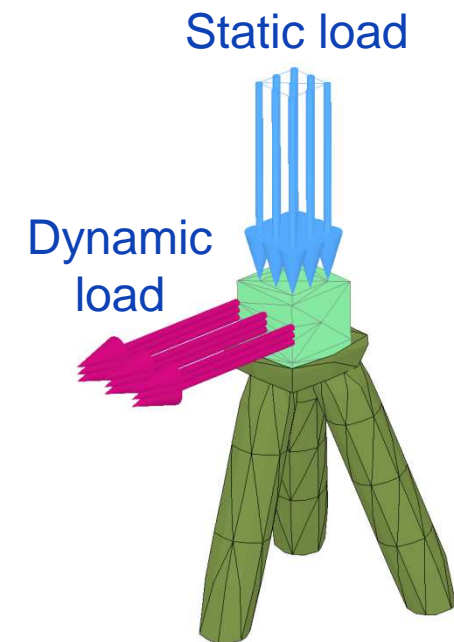
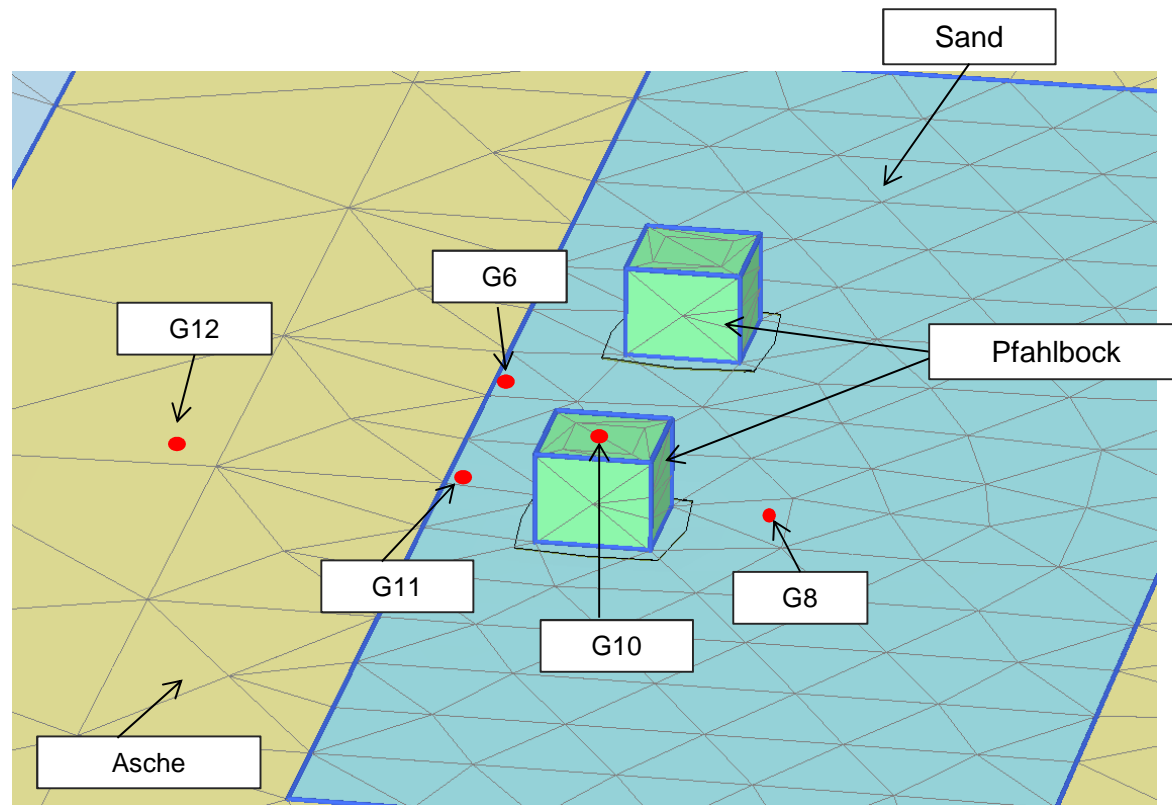
## 3D-FE-Analysen der Feldversuche



Model 3D	Number of elements	Number of nodes	Average of element size in m	Maximum length in m for 5 Hz
Simplified	4646	8026	0.48	2.55
Complete	5522	9097	1.71	

[Meybodi, 2014]

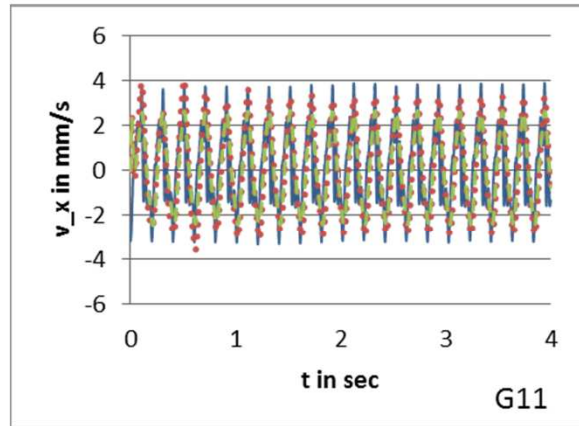
## 3D-FE-Analysen der Feldversuche



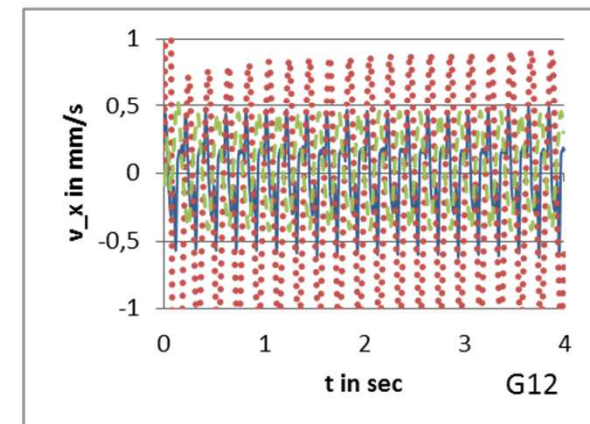
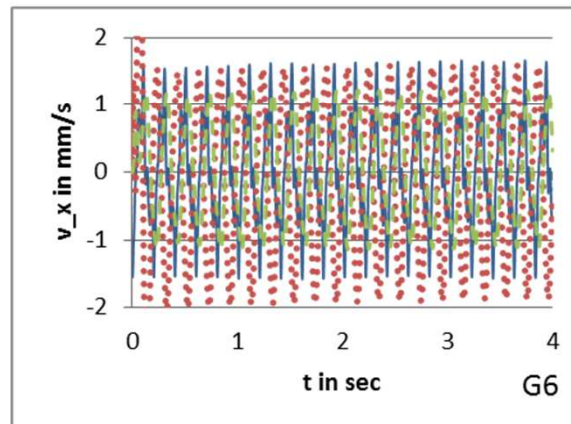
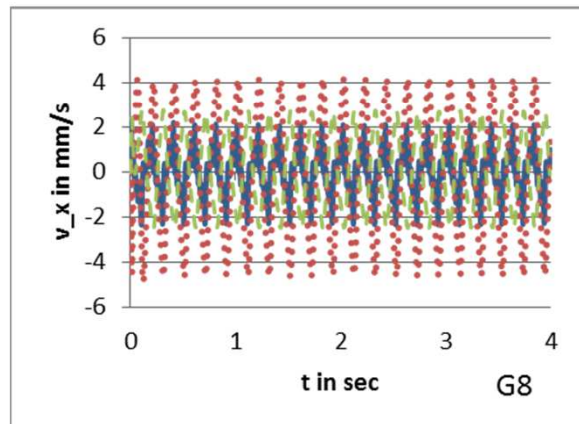
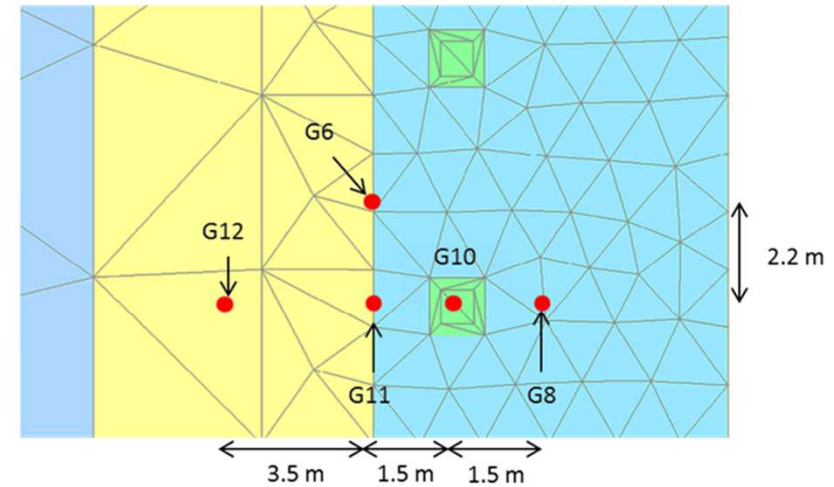
[Meybodi, 2014]

## 3D-FE-Analysen der Feldversuche – Ergebnisse

- Lauf 9 ( $V_{max}^{G10} = 20 \frac{mm}{s}$ ,  $f = 5\text{Hz}$ )



— Measured  
 ..... Simplified model  
 - - - Complete model



[Meybodi, 2014]

## 3D-FE-Analysen der Feldversuche – Ausblick

- Anwendung des validierten 3D-FE-Modells auf gesättigte Verhältnisse → erste Berechnungen bereits erfolgt
- Entwicklung geeigneter Pfahlbocksysteme für standardisierte Gebäudetypen → noch keine geeigneten Kandidaten für die weitere Bearbeitung in Sicht

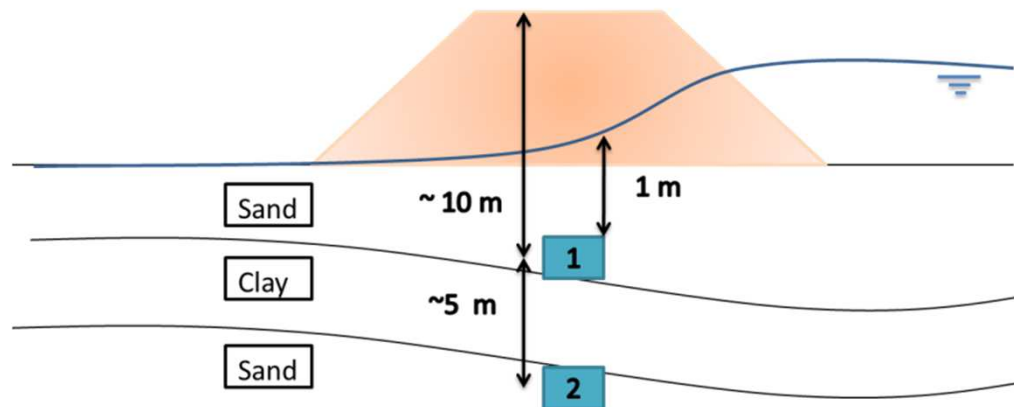
# Inhaltsübersicht

- Hypoplastizität – Entmystifizierung
- Entwicklung eines Mikropfahl-Tiefgründungssystems
- **Numerische Bestimmung eines „Magnitude Scaling Factors“**
- Weitere Projekte

# Numerische Bestimmung eines „Magnitude Scaling Factors“

## Situation in Groningen, Niederlande:

- Menschgemachte seismische Ereignisse (Erdbeben) infolge langjähriger Erdgasförderung
  - Primärdeiche auf teilweise locker gelagerten Sanden erbaut
- Verflüssigung dieser lockeren Sande muss mit ausreichender Sicherheit ausgeschlossen werden



## Numerische Bestimmung eines „Magnitude Scaling Factors“

Praxis üblich soll mit etablierten empirischen Verfahren gearbeitet werden

→ Nachweis ausreichender Sicherheit gegen Verflüssigung gemäß EERI-MNO12 (Idriss & Boulanger, 2008):

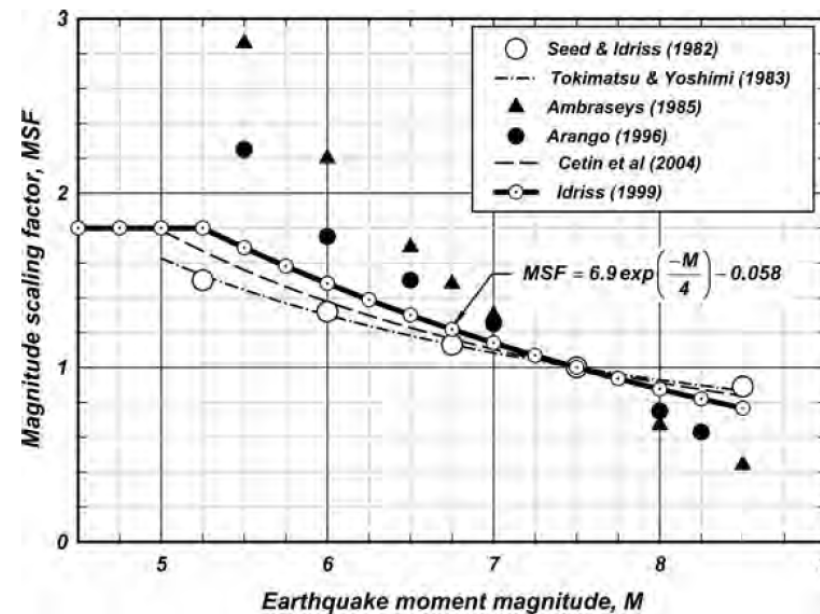
$$FS_{liq} = \frac{CRR}{CSR} = \frac{\text{"zyklisches Widerstandsverhältnis"}}{\text{"zyklisches Scherspannungsverhältnis"}}$$

$$CSR = \frac{t_{cyc}}{\sigma'_{vc}}$$

# Numerische Bestimmung eines „Magnitude Scaling Factors“

Beziehung für MSF nur für echte Erdbeben mit einer  $M > 5$

$$CSR_{M=7,5, \sigma'_{vc}=0} = 0,65 \cdot \frac{\sigma_{vc}}{\sigma'_{vc}} \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot r_d \cdot \frac{1}{MSF} \cdot \frac{1}{K_\sigma}$$

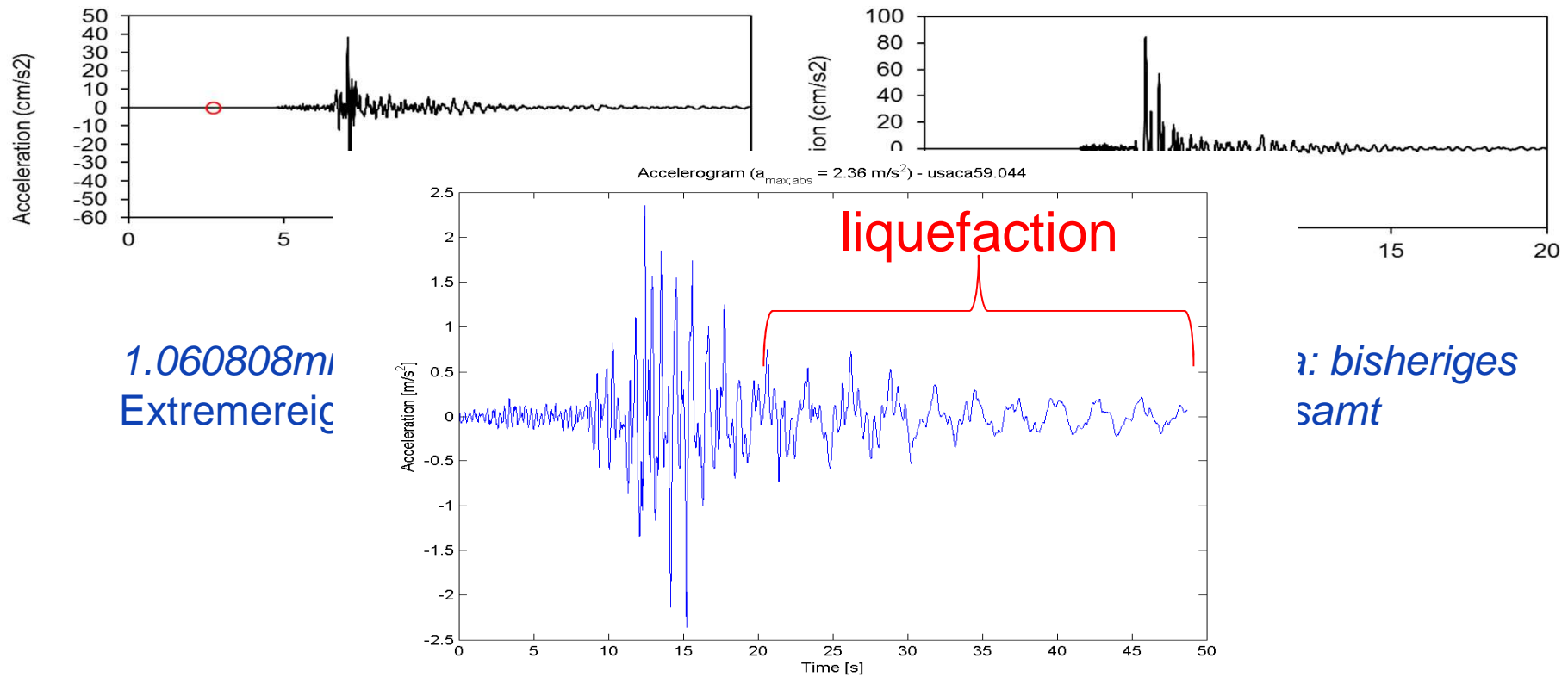


[EERI-MNO12]



# Numerische Bestimmung eines „Magnitude Scaling Factors“

Beziehung für MSF nur für echte Erdbeben mit einer  $M > 5,9$ , **ABER**



# Numerische Bestimmung eines „Magnitude Scaling Factors“

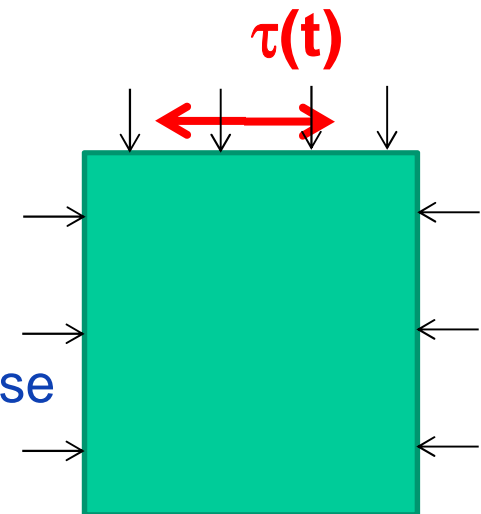
## Idee:

Numerische dynamische Elementversuche mit Materialparametern kalibriert auf der Grundlage vorhandener Laborversuche und

- Erdbebensignal (M = 7,5, N = 15 Zyklen, hier Loma Prieta, 1989)
- Groningen mid1- und mid3-Signal

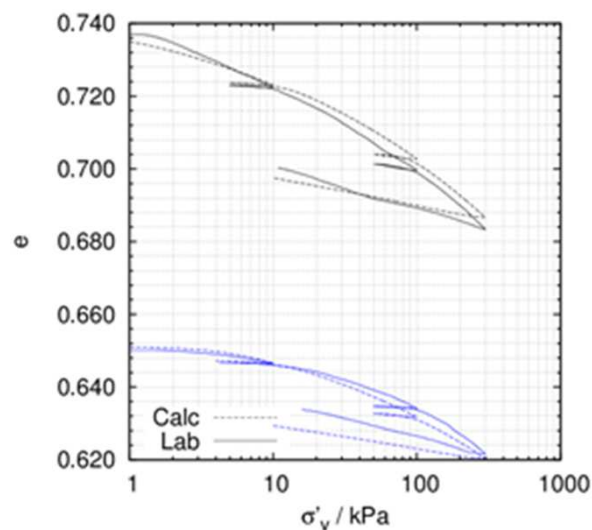
Skalierung der Signale so dass zum annähernd gleichen Zeitpunkt (10 s) rechnerisch Verflüssigung auftritt.

→ Anpassung des **MSF** für lokale Böden und Ereignisse

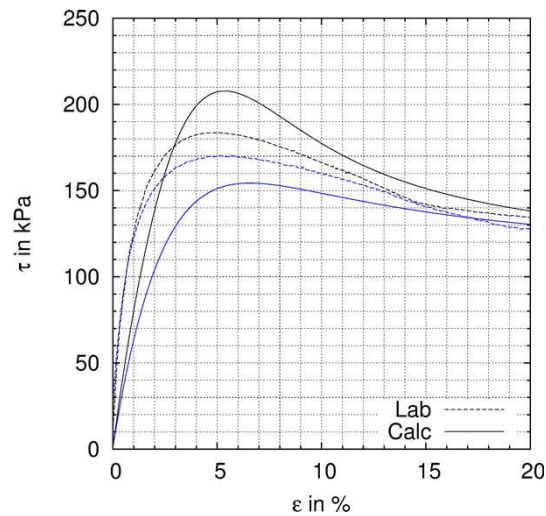


# Numerische Bestimmung eines „Magnitude Scaling Factors“

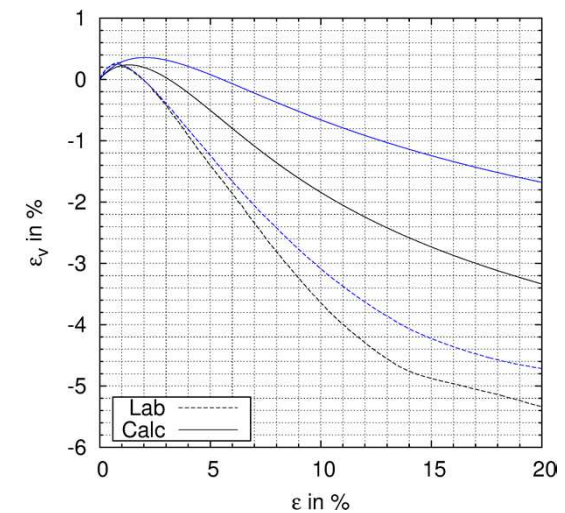
## Kalibrierung Hypoplastizität mit intergranularer Dehnung



Ödometerversuche mit Ent-/Wiederbelastung für lockere und dichte Anfangslagerung



CID-Triaxialversuche für lockere und dichte Anfangslagerung und verschiedene Konsolidierungsspannungen

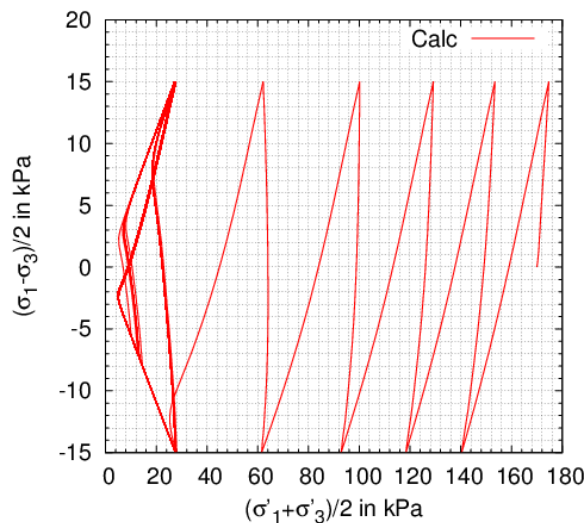


*Feinanteil  
FC = 5%*

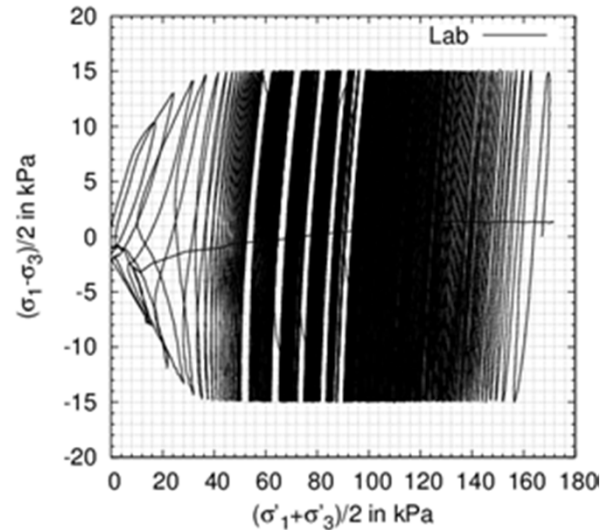
# Numerische Bestimmung eines „Magnitude Scaling Factors“

## Kalibrierung Hypoplastizität mit intergranularer Dehnung

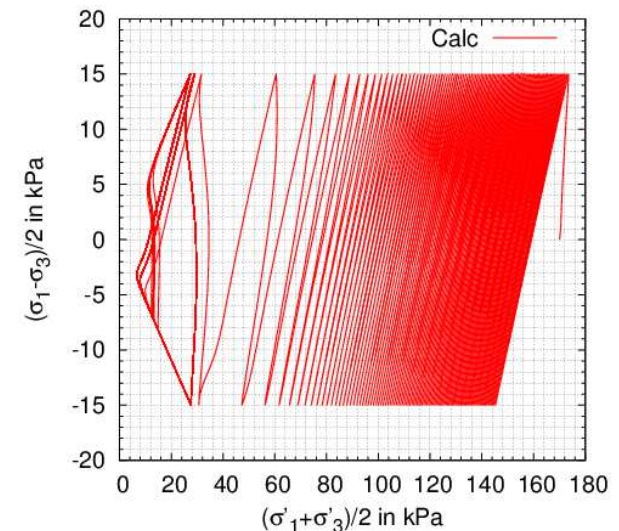
(Boring 160, Sample 10AB-LD, depth -4.88 till -5.28m NAP),  $e_0=0.781$ , no. of cycles to liquef.:  $n(\text{test})=410$ ,  $n(\text{Calc})=410$ )



Konventionelle Kalibrierung

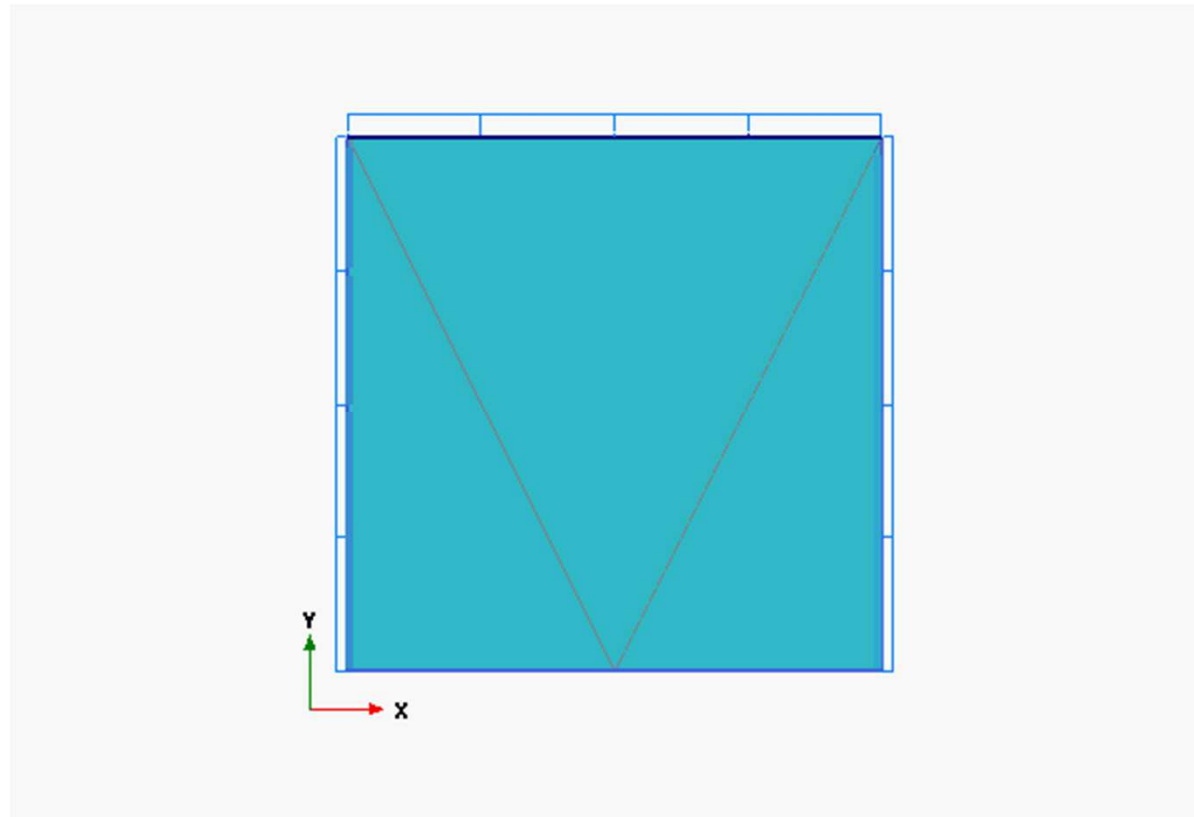


*Feinanteil*  
*FC = 5%*



Optimierte Kalibrierung auf  
Grundlage undränkter  
zyklischer Triaxialversuche

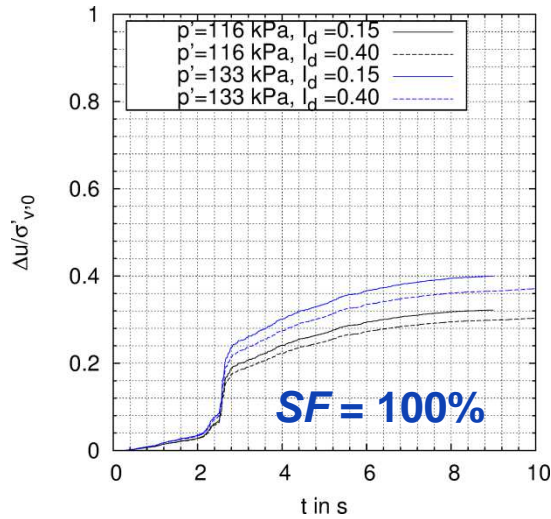
# Numerische Bestimmung eines „Magnitude Scaling Factors“



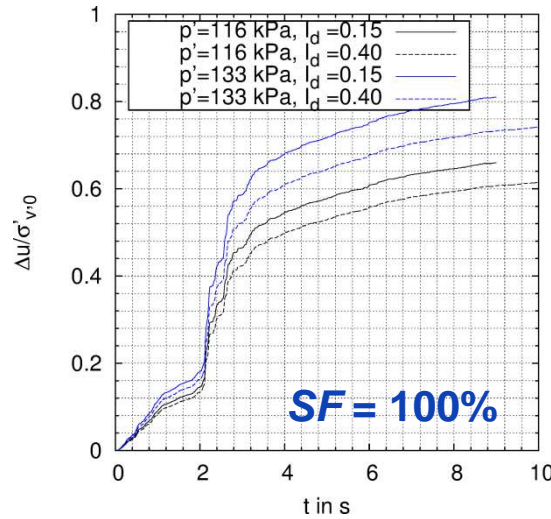


# Numerische Bestimmung eines „Magnitude Scaling Factors“

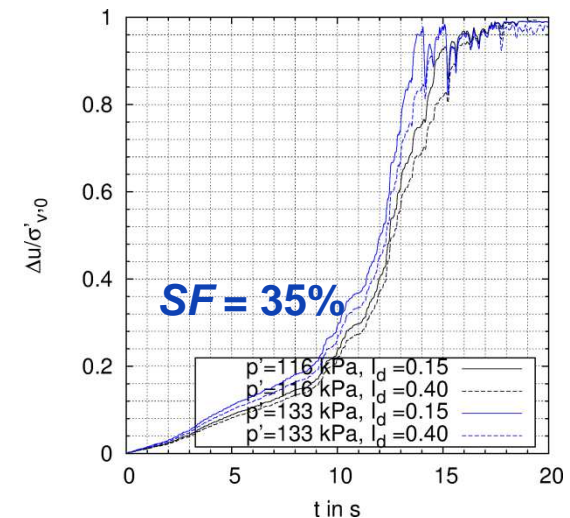
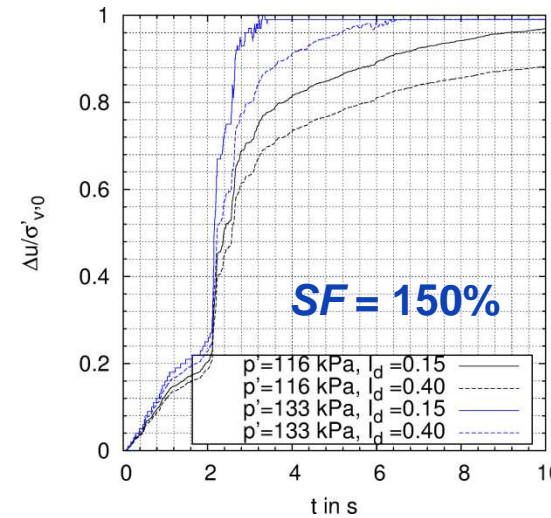
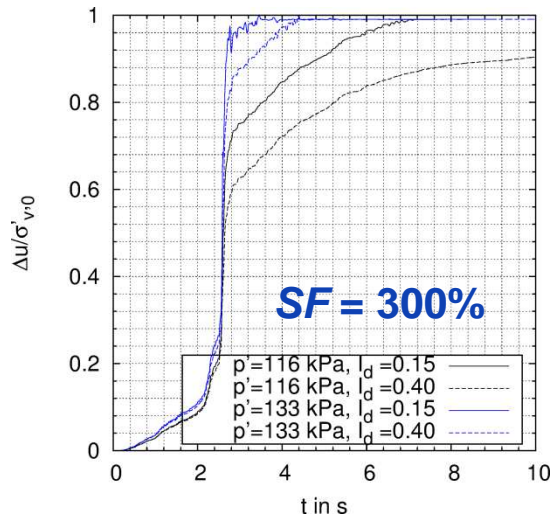
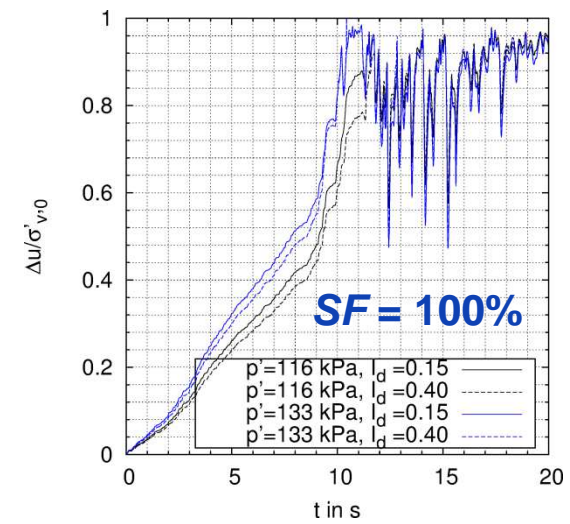
Groningen mid3 signal



Groningen mid1 signal

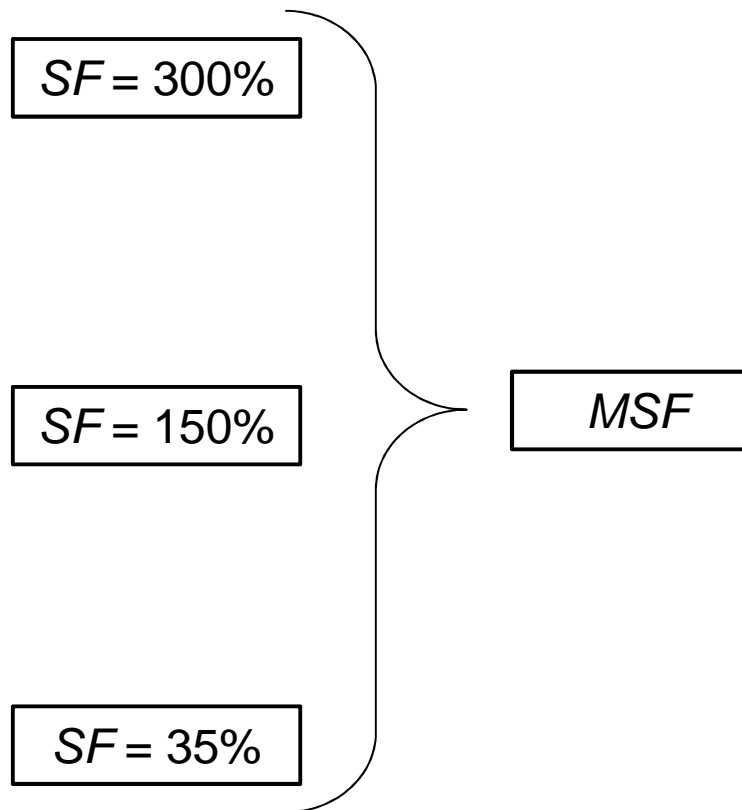


tectonic signal



## Numerische Bestimmung eines „Magnitude Scaling Factors“

Groningen mid3 signal	$\Delta u / \sigma'_{v,0}$
100%	0.3...0.4
250%	0.66....0.99
300%	0.9....1
Groningen mid1 signal	$\Delta u / \sigma'_{v,0}$
100%	0,6.....0,8
125%	0.75....1.0
150%	0.88....1.0
tectonic signal	$\Delta u / \sigma'_{v,0}$
100%	1
15%	0.49....0.65
25%	0.79....0.99
35%	1

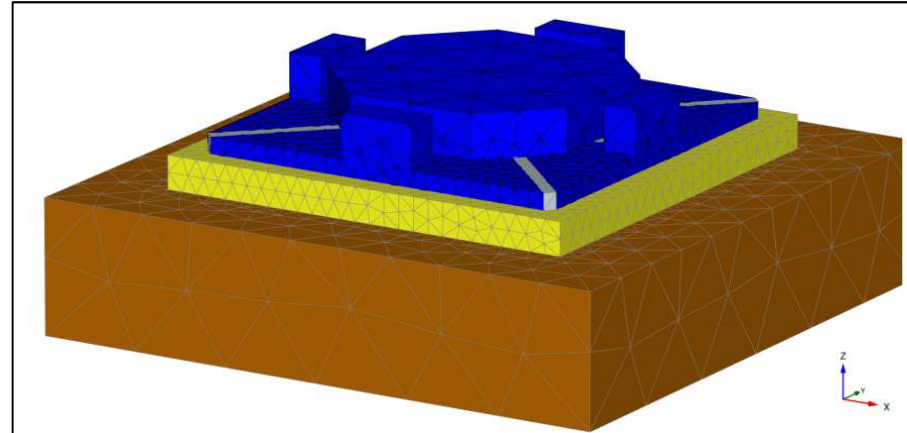
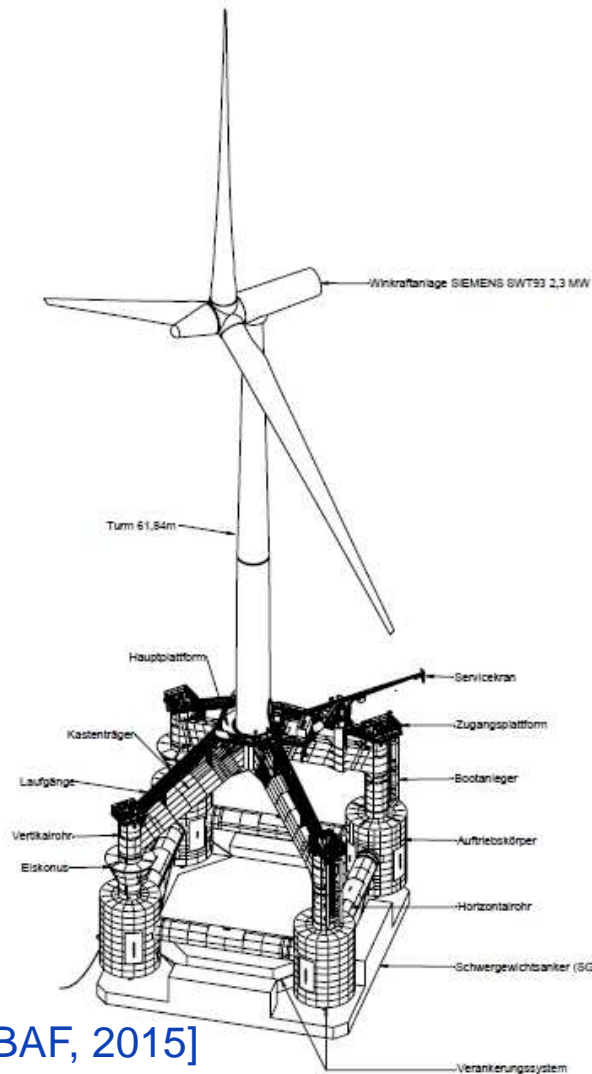


# Inhaltsübersicht

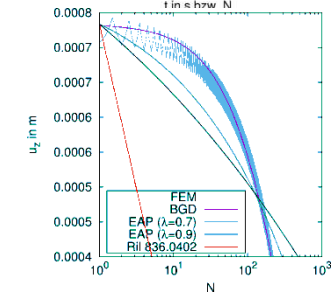
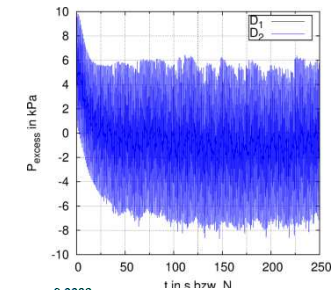
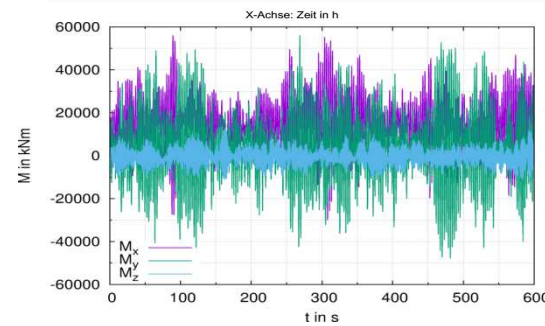
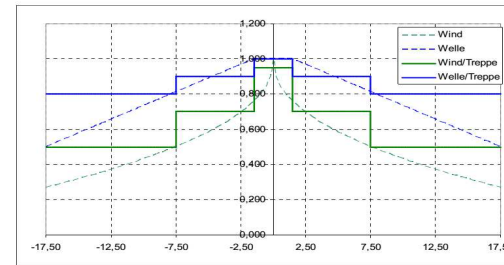
- Hypoplastizität – Entmystifizierung
- Entwicklung eines Mikropfahl-Tiefgründungssystems
- Numerische Bestimmung eines „Magnitude Scaling Factors“
- Weitere Projekte



# GICON®'s Schwimmendes Offshore Fundament (SOF®)



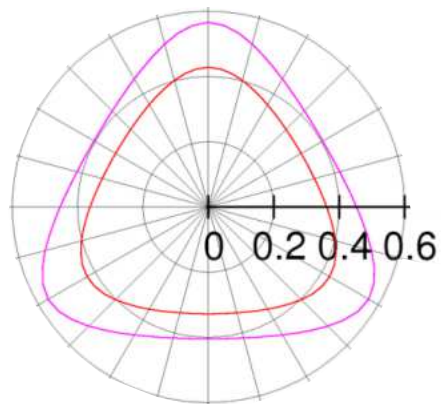
Y-Achse: Normierte Wellenhöhe bzw. Windgeschwindigkeit



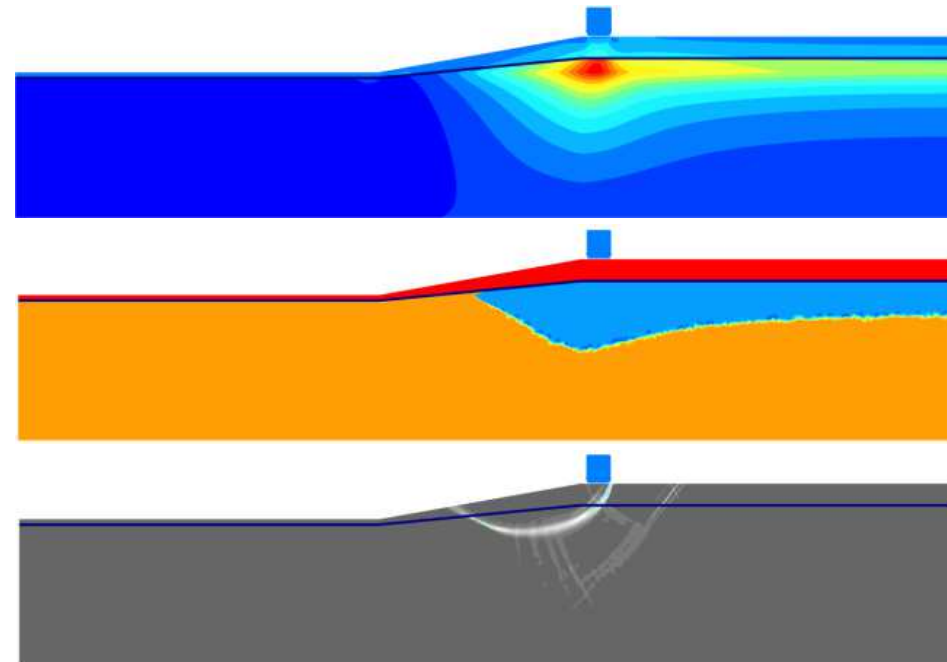
[TUBAF, 2015]

25 JAHRE BAUGRUND DRESDEN, 03. MÄRZ.2016

# Prüfung und Optimierung eines Stabilitätsnachweises für Innenkippen (LMBV)

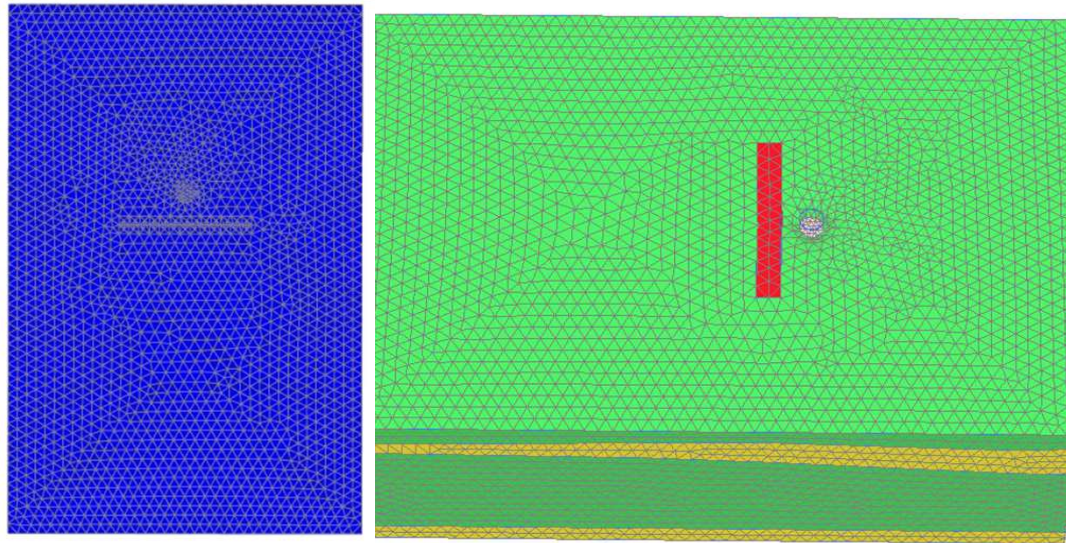


$\varphi_c = 30^\circ$
$f_d = 1,1$ ( $l_D = 1,20$ )
Stab.krit. ————
Grenz.krit. ————

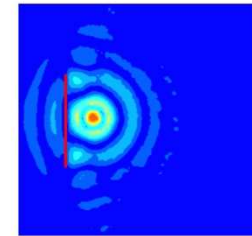


$$\begin{aligned}
 W_2(\mathbf{T}_s) = & f_d^2 \bar{N}_3^2 \{ 16 \bar{L}_{11}^4 - 32 \bar{L}_{11}^3 \bar{L}_{33} + f_d^4 (3 \bar{N}_1^4 + 3 \bar{N}_1^2 \bar{N}_3^2 + \bar{N}_3^4) \\
 & + 2 \bar{L}_{11} \bar{L}_{33} [4 \bar{L}_{33}^2 + f_d^2 (19 \bar{N}_1^2 - 4 \bar{N}_3^2)] - \bar{L}_{33}^2 f_d^2 (20 \bar{N}_1^2 + \bar{N}_3^2) \\
 & + 4 \bar{L}_{11}^2 [2 \bar{L}_{33}^2 + f_d^2 (2 \bar{N}_3^2 - 5 \bar{N}_1^2)] \} \\
 & - [\bar{L}_{11}^2 - f_d^2 \bar{N}_1^2] [4 \bar{L}_{33} (\bar{L}_{33} - \bar{L}_{11}) + f_d^2 \bar{N}_1^2]^2 = 0
 \end{aligned}$$

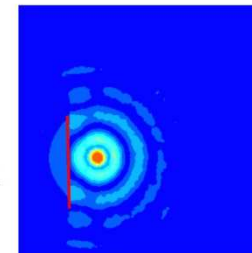
# Abschirmungselemente gegen Bodenerschütterungen (Keller, Institut für Geotechnik, TUD)



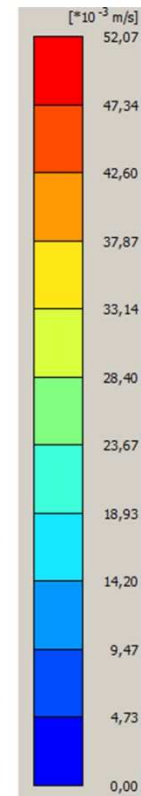
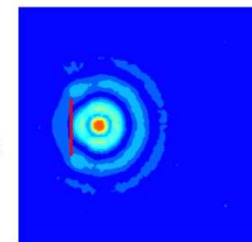
Feld 1  
Beton



Feld 2  
Polymer 1



Feld 3  
Polymer 2



[Walther, 2014]

Vielen Dank für Ihre geschätzte Aufmerksamkeit!

[meier@baugrund-dresden.de](mailto:meier@baugrund-dresden.de)