

Tiefengründung einer schwimmenden Offshore- Unterstruktur für Windenergieanlagen – Einblicke in die Umsetzung einer Pilotanlage

Dr.-Ing. Thomas Meier

BAUGRUND DRESDEN Ingenieurgesellschaft mbH

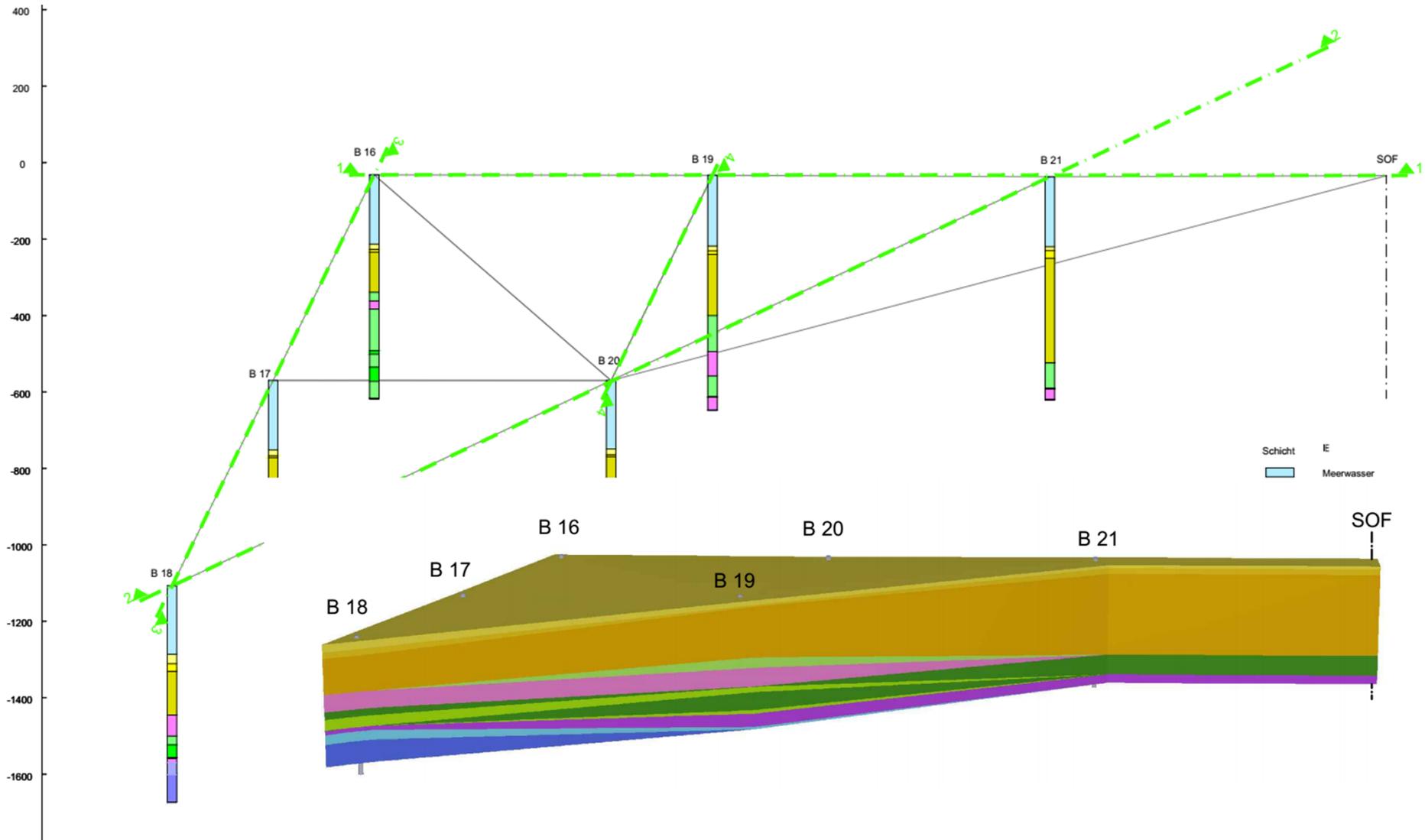
Inhaltsübersicht

- Geotechnische Erkundung
- Numerische Voruntersuchungen
- Geotechnische Nachweise
- Schlussfolgerungen

Geotechnische Erkundung

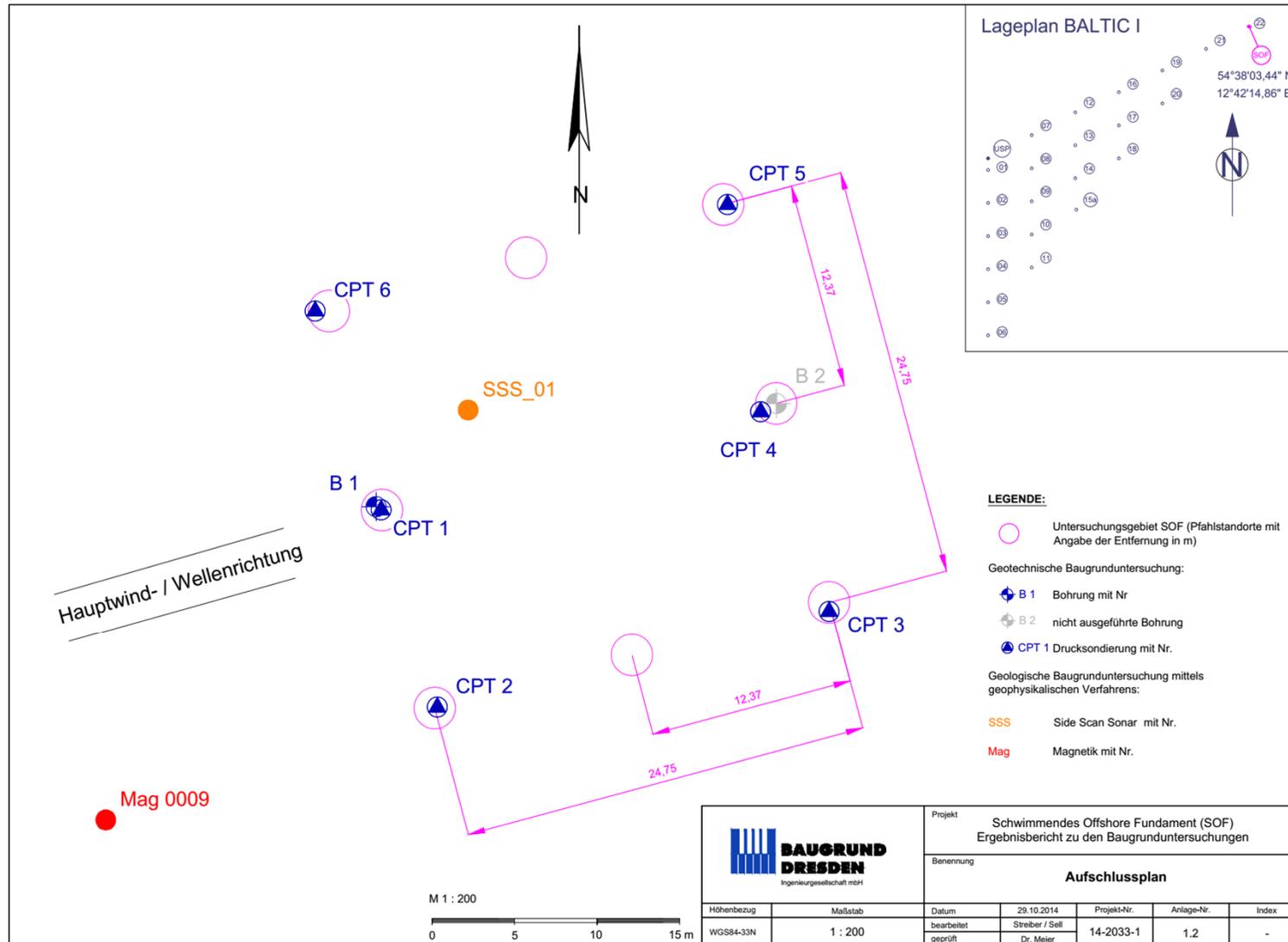
- „Desk study“ – Vorstudie
- Offshore-Erkundungskonzept
- Begleitung der Offshore-Erkundungen

Geotechnische Erkundung – Desk study



9. FREIBERGER GEOTECHNIK KOLLOQUIUM, 09.06.2016

Geotechnische Erkundung – Offshore-Erkundungskonzept





9. FREIBERGER GEOTECHNIK KOLLOQUIUM, 09.06.2016



9. FREIBERGER GEOTECHNIK KOLLOQUIUM, 09.06.2016

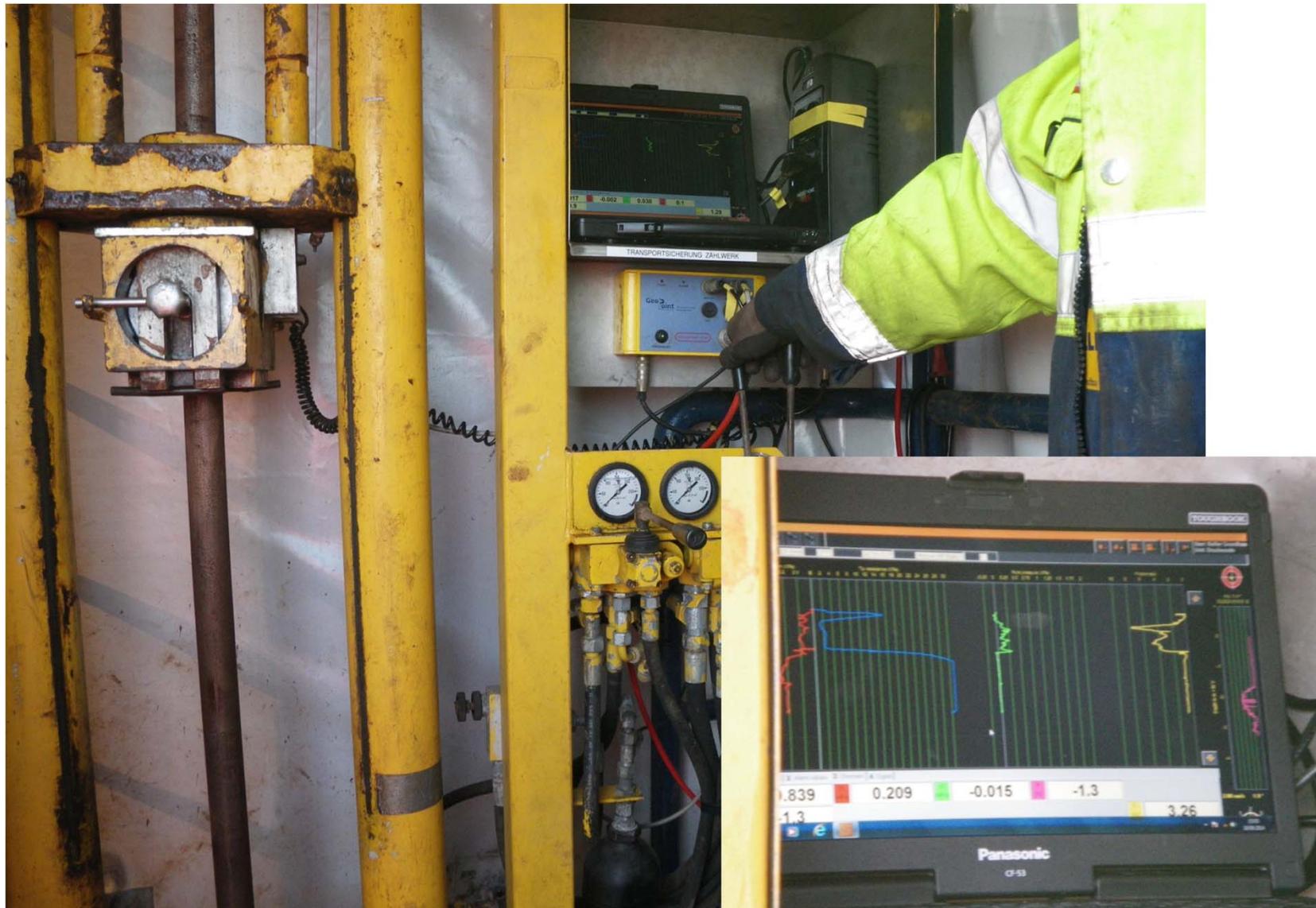




9. FREIBERGER GEOTECHNIK KOLLOQUIUM, 09.06.2016



9. FREIBERGER GEOTECHNIK KOLLOQUIUM, 09.06.2016



9. FREIBERGER GEOTECHNIK KOLLOQUIUM, 09.06.2016

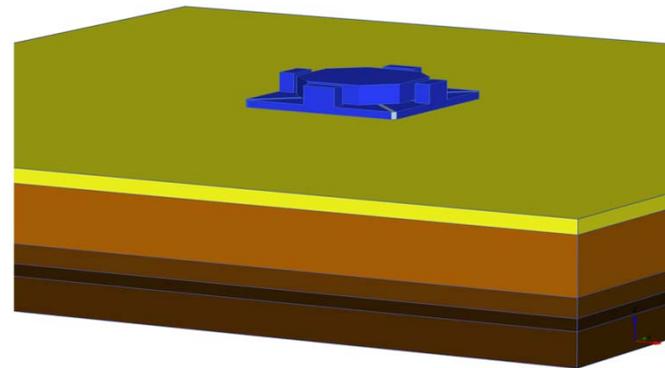
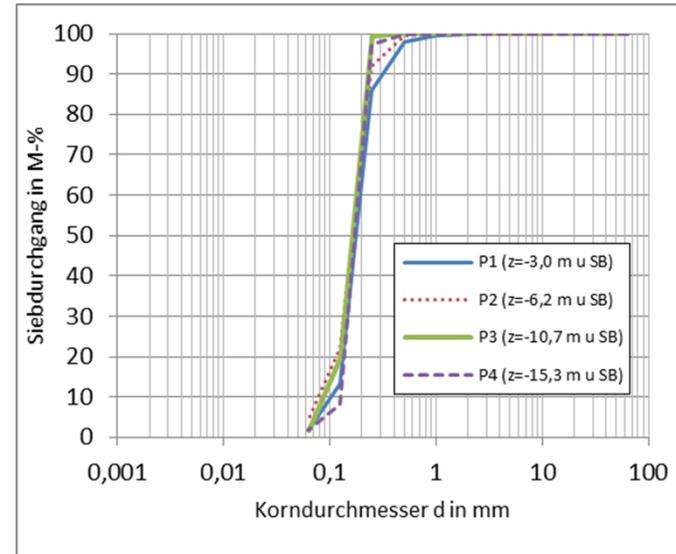
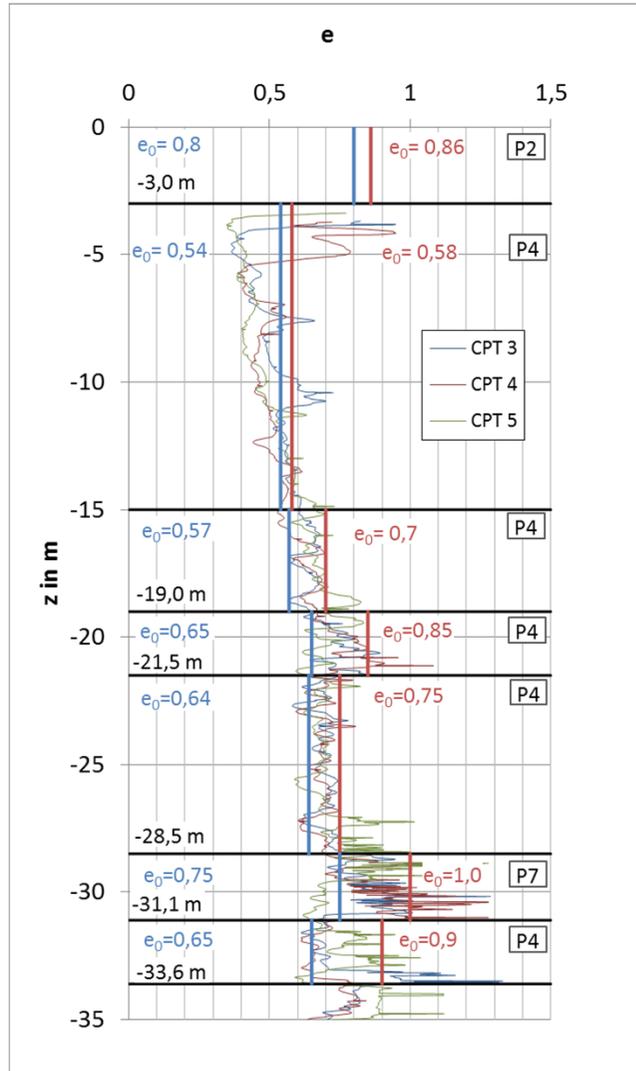
Inhaltsübersicht

- Geotechnische Erkundung
- Numerische Voruntersuchungen
- Geotechnische Nachweise
- Schlussfolgerungen

Numerische Voruntersuchungen

- Baugrundmodell
- Stoffmodell und Kalibrierung
- Ersatzfedersteifigkeiten Stahlrohrpfahl
- Flachgründung: Vereinfachter „Absetznachweis“
- Einwirkungen
- PWD-Akkumulation/Verflüssigung

Numerische Voruntersuchungen - Baugrundmodell



Numerische Voruntersuchungen – Stoffmodell / Kalibrierung

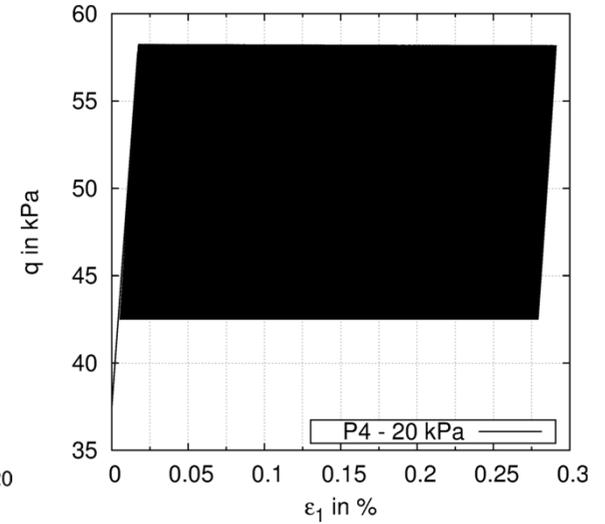
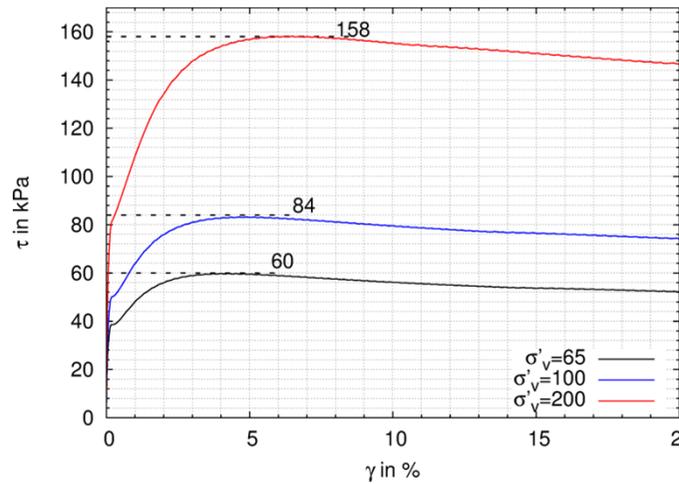
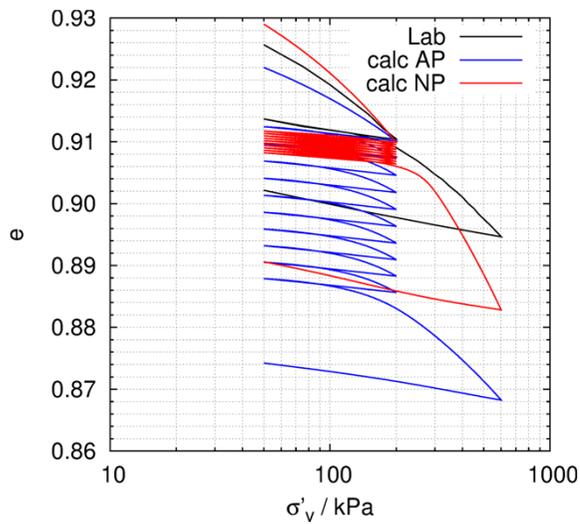
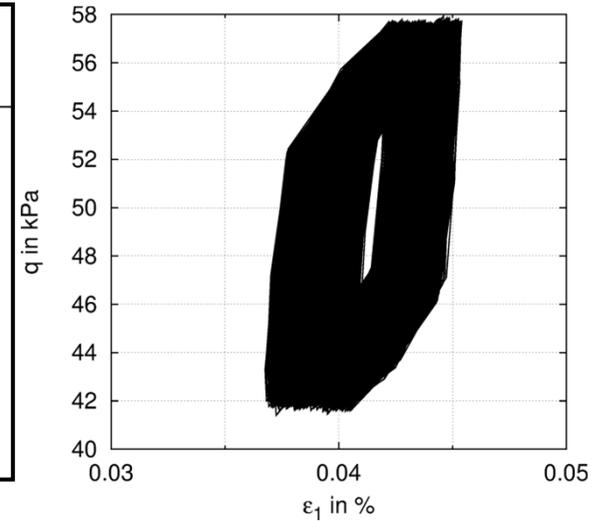
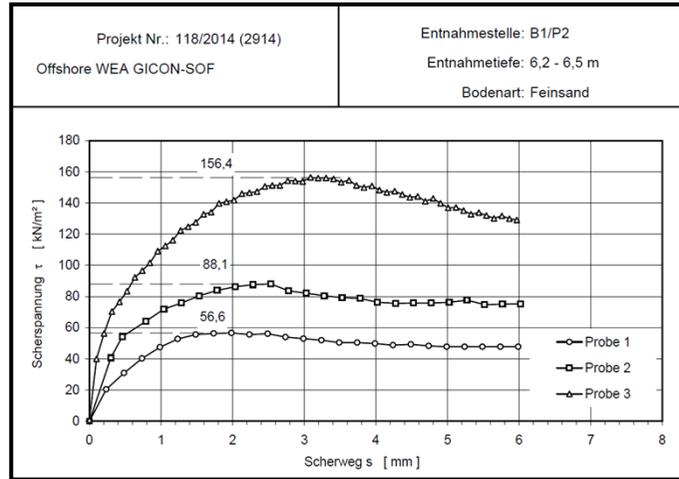
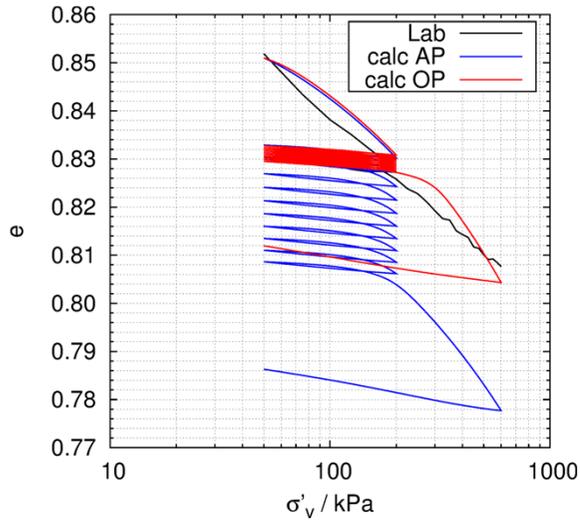
Stoffmodell muss in der Lage sein folgende physikalischen Gesichtspunkte wirklichkeitsnah zu berücksichtigen oder widerzugeben:

- Zustandsgröße Dichte
- Jüngste Deformationsgeschichte
- Spannungs-, Dichte- und Pfadabhängigkeit der Steifigkeit

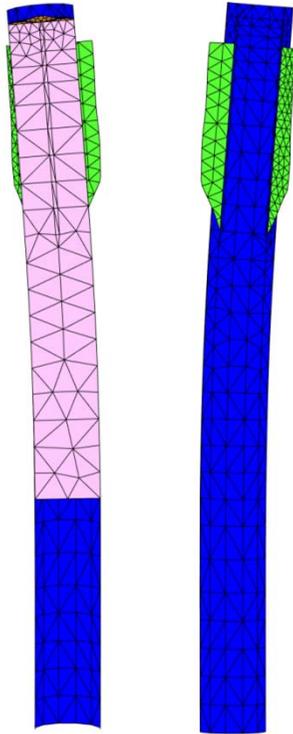
Hinsichtlich Anwendbarkeit in der geotechnischen Praxis:

- Freie Verfügbarkeit für unterschiedliche Plattformen
- Ausreichende Validierung (Elementversuche, Randwertprobleme)

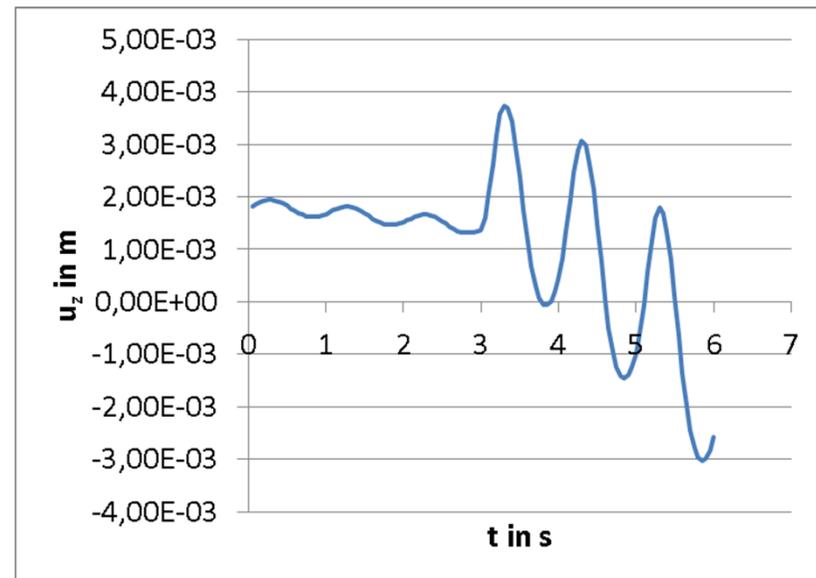
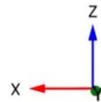
Numerische Voruntersuchungen – Stoffmodell / Kalibrierung



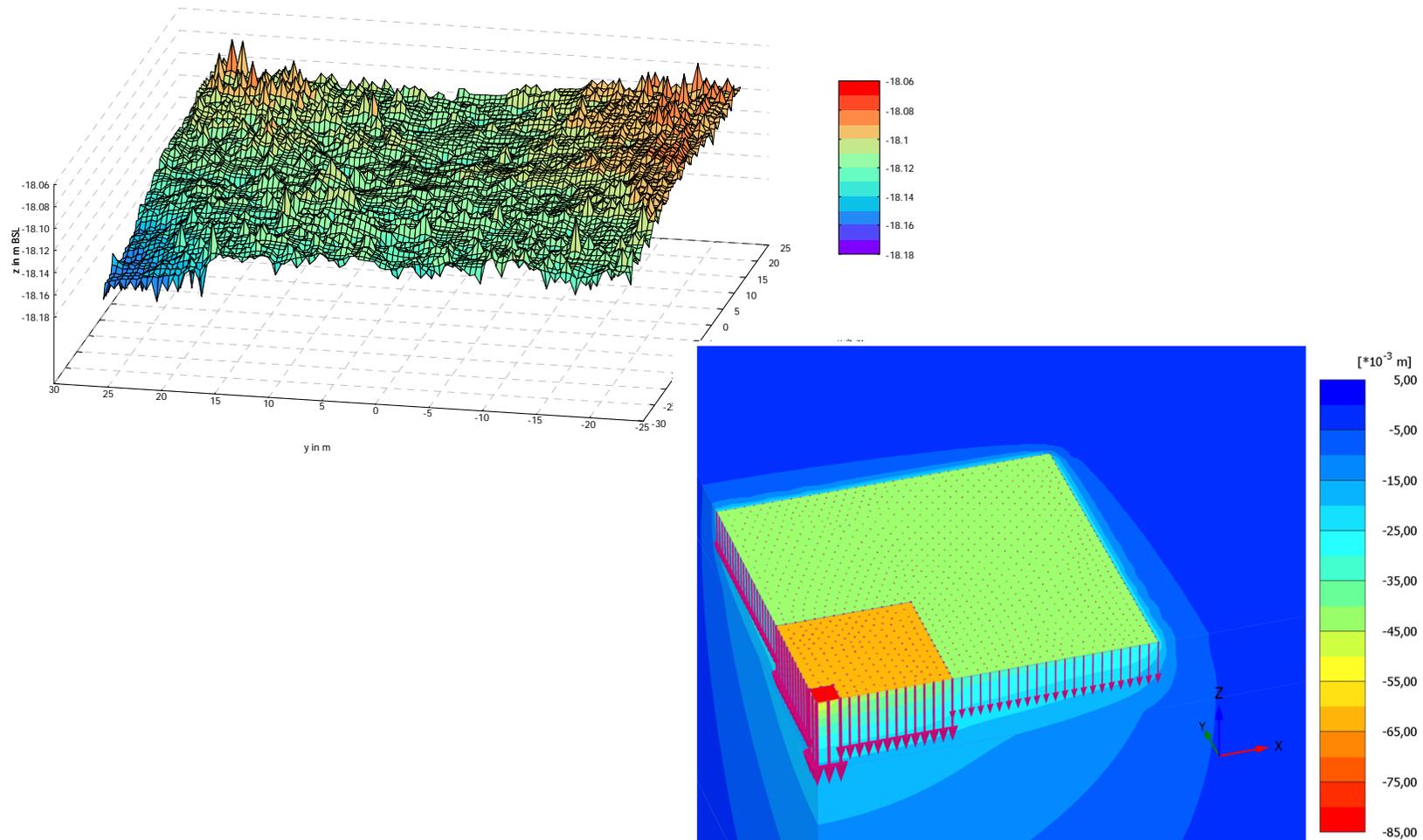
Numerische Voruntersuchungen – Ersatzfedersteifigkeiten



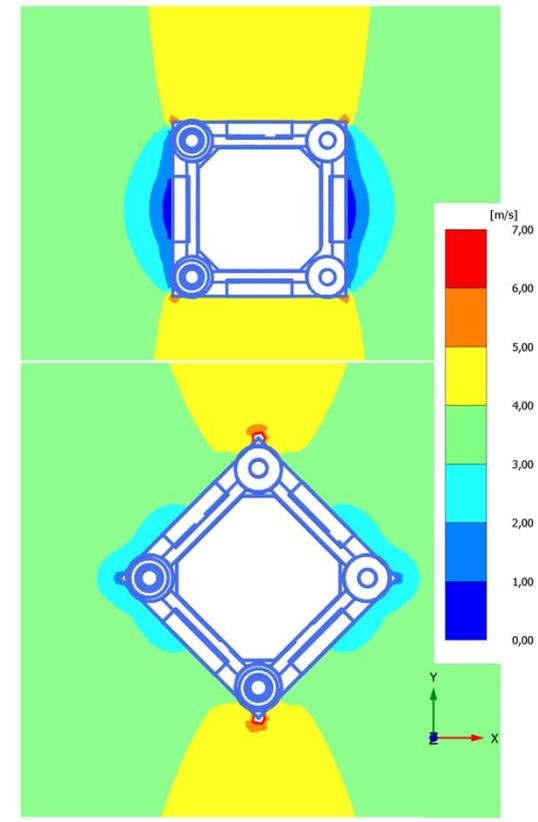
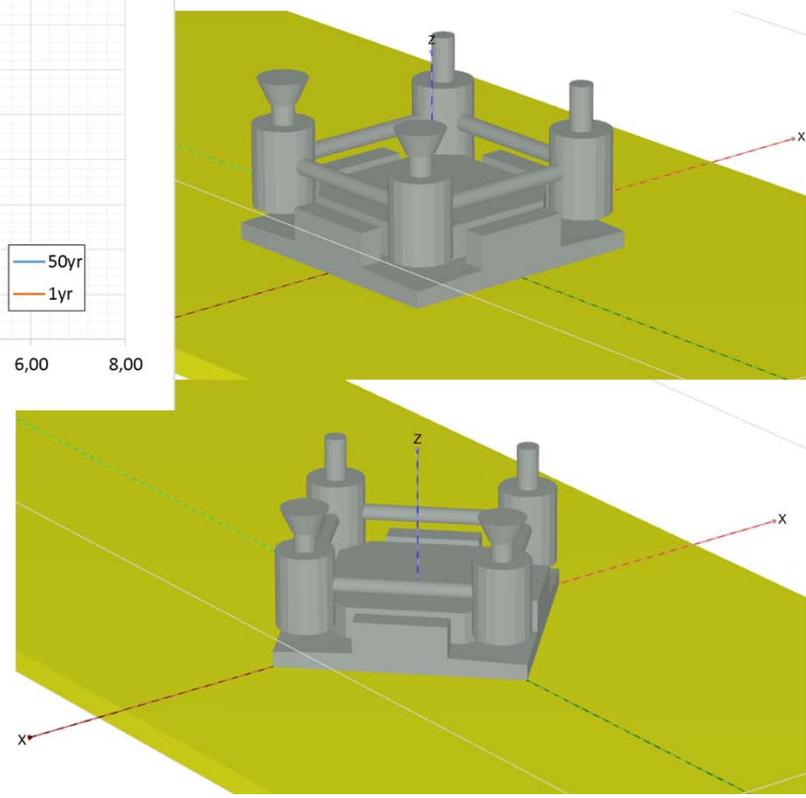
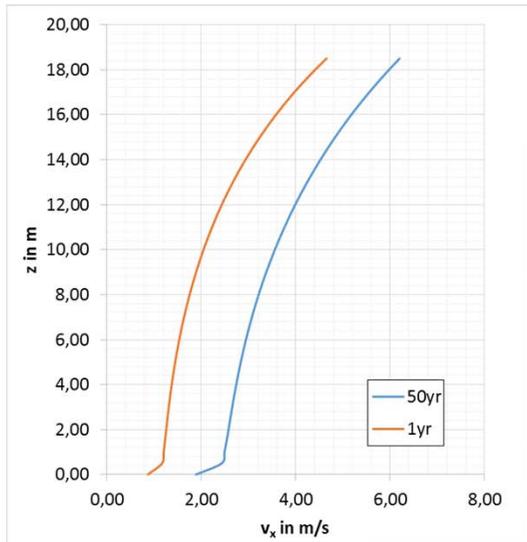
Steifigkeit Baugrundmodell	vertikal		horizontal	
	$k_v(10\% \Delta F_{v,max})$ in N/m	$k_v(100\% \Delta F_{v,max})$ in N/m	$k_h(10\% \Delta F_{v,max})$ in N/m	$k_h(100\% \Delta F_{v,max})$ in N/m
untere Grenze („weich“)	$1,279 \cdot 10^9$	$8,585 \cdot 10^8$	$1,788 \cdot 10^8$	$8,709 \cdot 10^7$
obere Grenze („steif“)	$1,350 \cdot 10^9$	$9,672 \cdot 10^8$	$1,896 \cdot 10^8$	$9,378 \cdot 10^7$



Numerische Voruntersuchungen – Absetznachweis

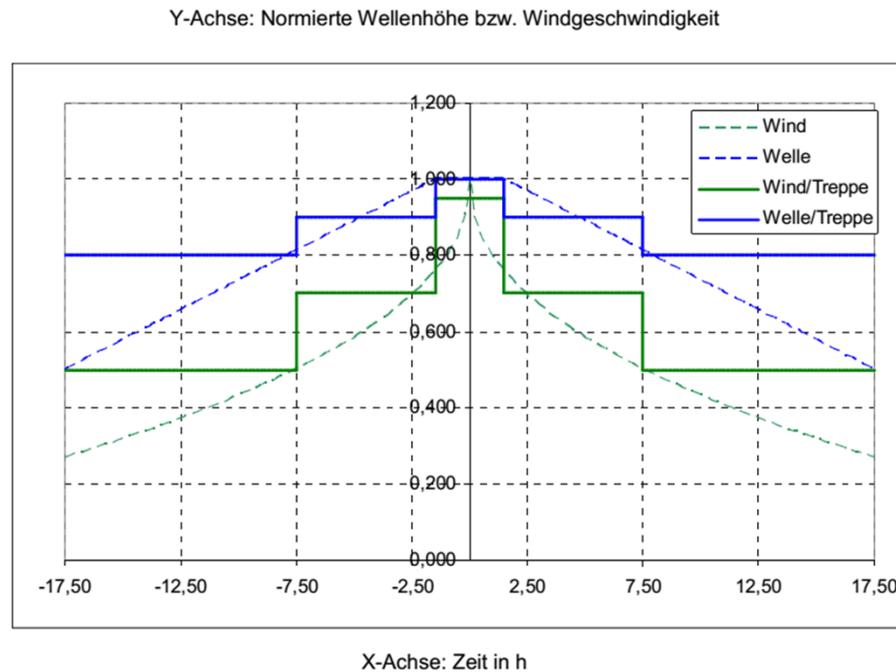


Numerische Voruntersuchungen – Kolkschutz

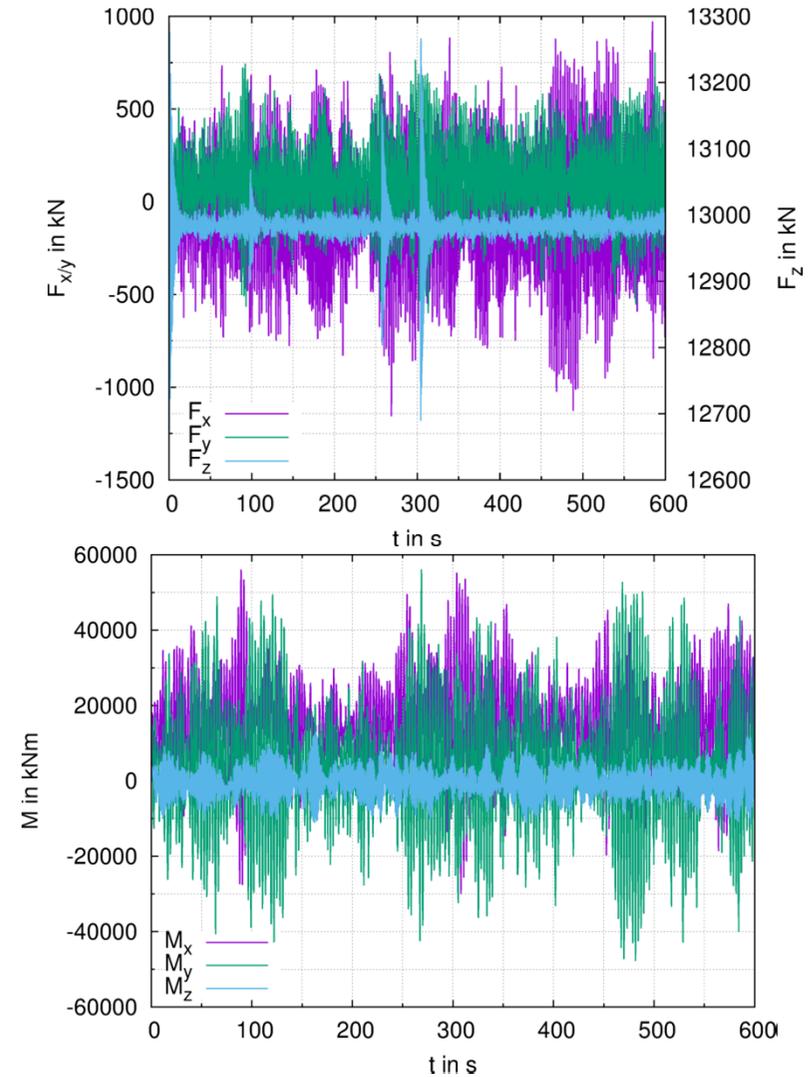


Numerische Voruntersuchungen – PWD-Akkumulation

1) Einwirkungen



Bemessungsereignis gemäß BSH-Standard



Numerische Voruntersuchungen – PWD-Akkumulation

1) Einwirkungen

Kritische Anmerkungen:

- Anwendung der Miner'schen Regel (Ermüdungsversagen von Feststoffen) für Böden widerspricht der bekanntermaßen vorhandenen Pfadabhängigkeit des mechanischen Verhaltens von Böden (vgl. auch Wichtmann, 2006)
- Bei Anwendung des RainFlow-Verfahrens (Bestimmung von Zyklen-Paketen unterschiedlicher Amplitude) gehen zeitliche Bezüge komplett verloren
- Damit auch die Zuordnung von Kraft- oder Momentenkomponenten (schon in einem Punkt)

M. A. Miner: *Cumulative damage in fatigue*. In: *Journal of applied mechanics*. Band 12, Nr. 3, 1945, S. 159–164.

T. Wichtmann et. al.: Gilt die Minersche Regel für Sand? In: *Bautechnik*, [83\(5\)](#):341–350, May 2006

Numerische Voruntersuchungen – PWD-Akkumulation

1) Einwirkungen

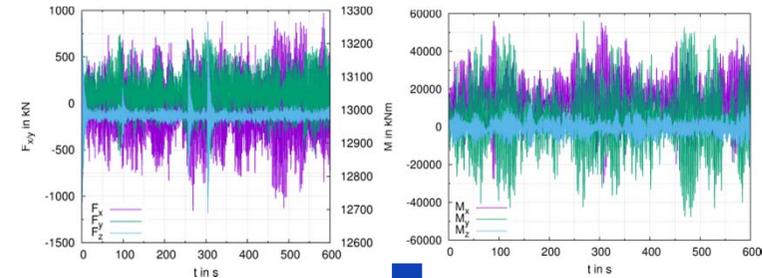
→ Die Existenz eines insgesamt äquivalenten oder besser repräsentativen Ersatzlastregimes darf angezweifelt werden.

Natürlich braucht es Werkzeuge/Verfahren für die Bau-Praxis. Hier besteht allerdings **Forschungs- und Entwicklungsbedarf** sowie Mut zur Wahrheit. Es sollte nicht der Eindruck erweckt werden, aktuell gebräuchliche Verfahren würden die Wirklichkeit widerspiegeln (z. B. nach dem Motto: Is' so, steht doch in EA-Pfähle) oder auf Grund ihrer (mathematischen) Komplexität wissenschaftlich fundiert sein, mögen sie sich in der Anwendung auch bewehrt haben.

Numerische Voruntersuchungen – PWD-Akkumulation

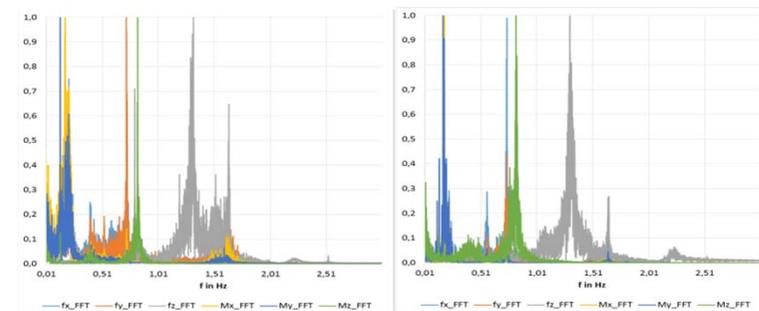
1) Einwirkungen

- I. 1 Stufen-Ersatzlastregime mit **Amplituden gemäß Minima und Maxima** der Zeitverläufe der Einwirkungen



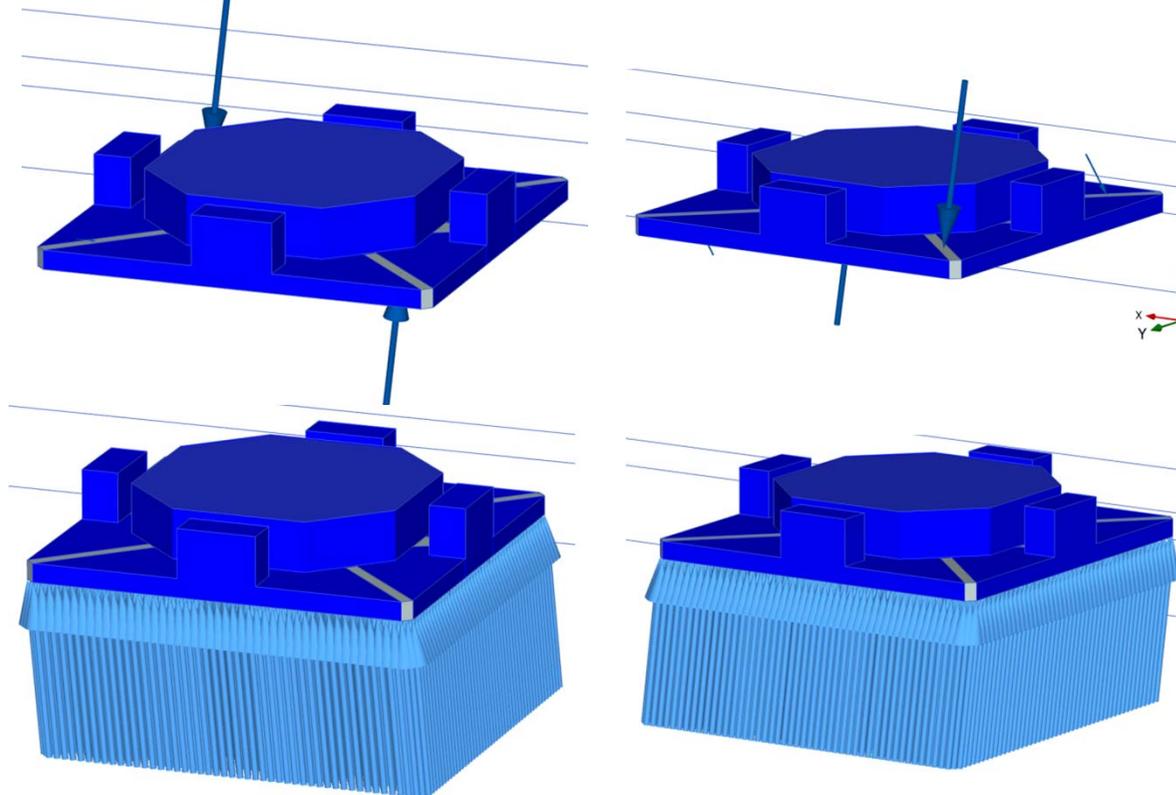
DLC 1.2 ($v_w=14$ m/s, $u_{current}=0,9$ m/s)	F_x in kN	F_y in kN	F_z in kN	$ F_{n,res} $ in kN	M_x in kNm	M_y in kNm	M_z in kNm
max	201	236	13.289	310	16.775	31.304	5.273
min	-433	-42	12.660	430	268	934	-4.535
DLC 6.1 ohne Eis ($v_w=50$ m/s, $u_{current}=1.5$ m/s)	F_x in kN	F_y in kN	F_z in kN	$ F_{n,res} $ in kN	M_x in kNm	M_y in kNm	M_z in kNm
max	973	805	13.290	1.263	56.058	56.108	12.890
min	-1155	-600	12.674	1.302	-29.988	-47.753	-11.464

- II. Berücksichtigung der **Zeit (PWD-Entwicklung)** durch Ableitung einer Hauptfrequenz durch Fourier-Transformation der Einwirkungszeitreihen



Numerische Voruntersuchungen – PWD-Akkumulation

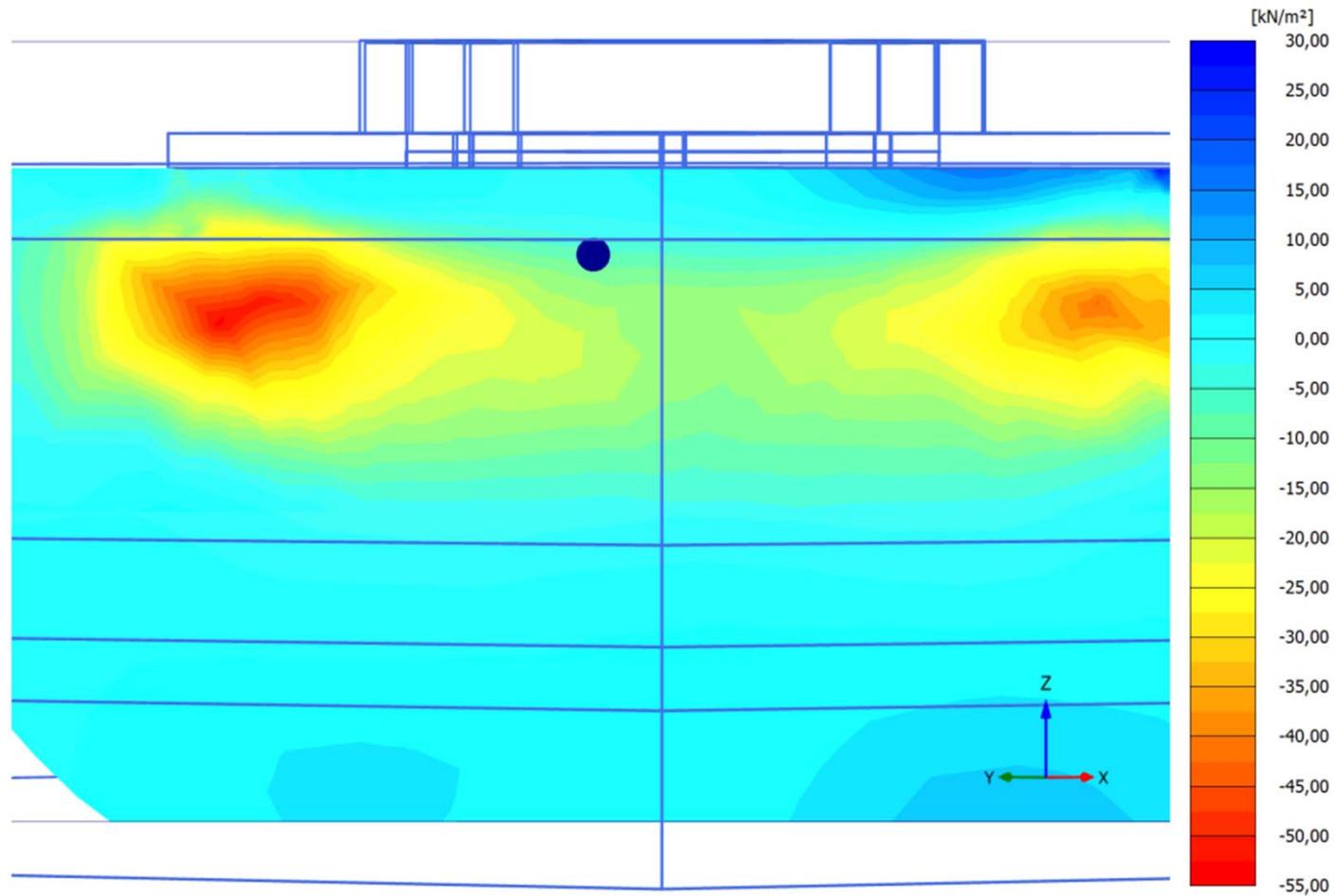
1) Einwirkungen



Einwirkungen (Punktlasten und Flächenlast) als Sägezahnkurve mit Frequenz $f = 1$ Hz

Numerische Voruntersuchungen – PWD-Akkumulation

2) Ergebnis ($n = 50$ Last-Zyklen)



Inhaltsübersicht

- Geotechnische Erkundung
- Numerische Voruntersuchungen
- **Geotechnische Nachweise**
- Schlussfolgerungen

Geotechnische Nachweise

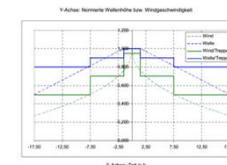
Grenzzustände der Tragfähigkeit (ULS):

- Pfahl-Tragfähigkeit (Auszieh Widerstand und horizontales Erdwiderlager)
- Grundbruch, Gleiten für Flachgründung

Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit (SLS):

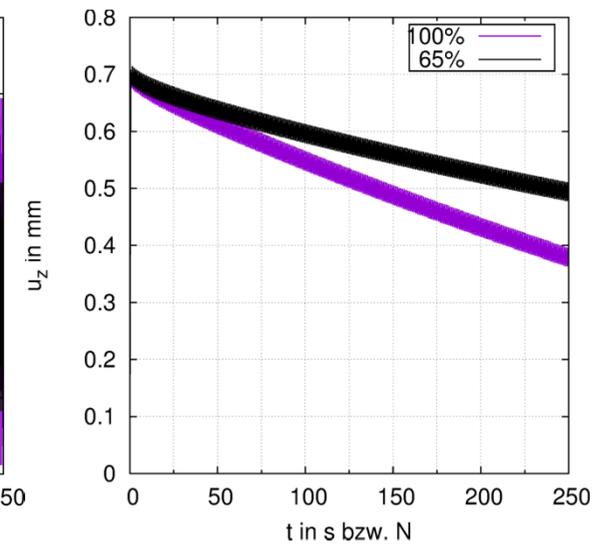
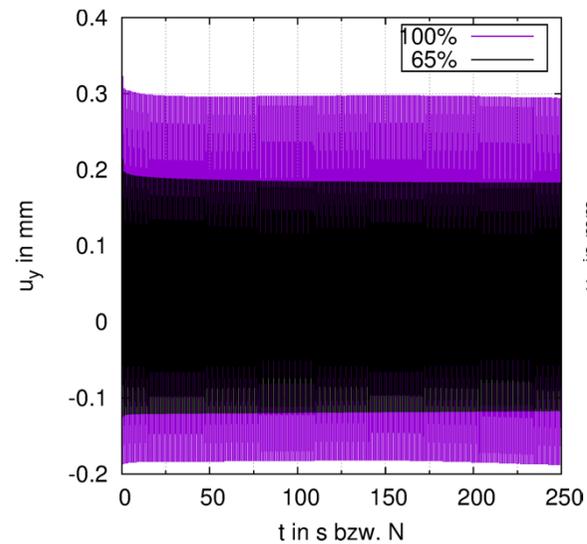
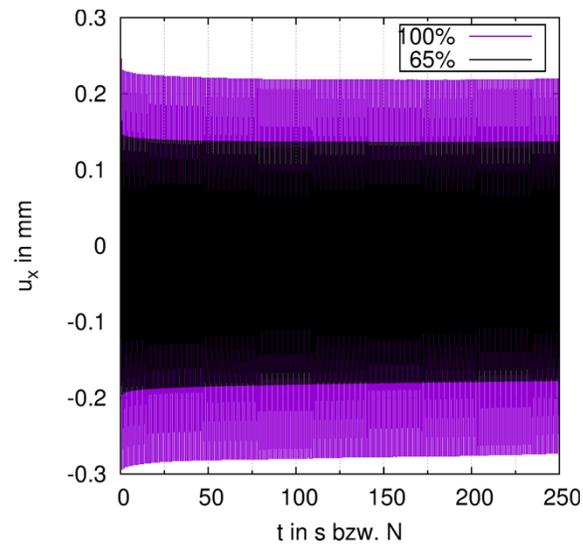
- Kippen bzw. Klaffende Fuge
- Einhaltung projektspezifischer Verschiebungs- oder Verkippungsgrenzwerte

unter Berücksichtigung des BSH-Bemessungsereignisses.



Geotechnische Nachweise – Verformungsberechnung

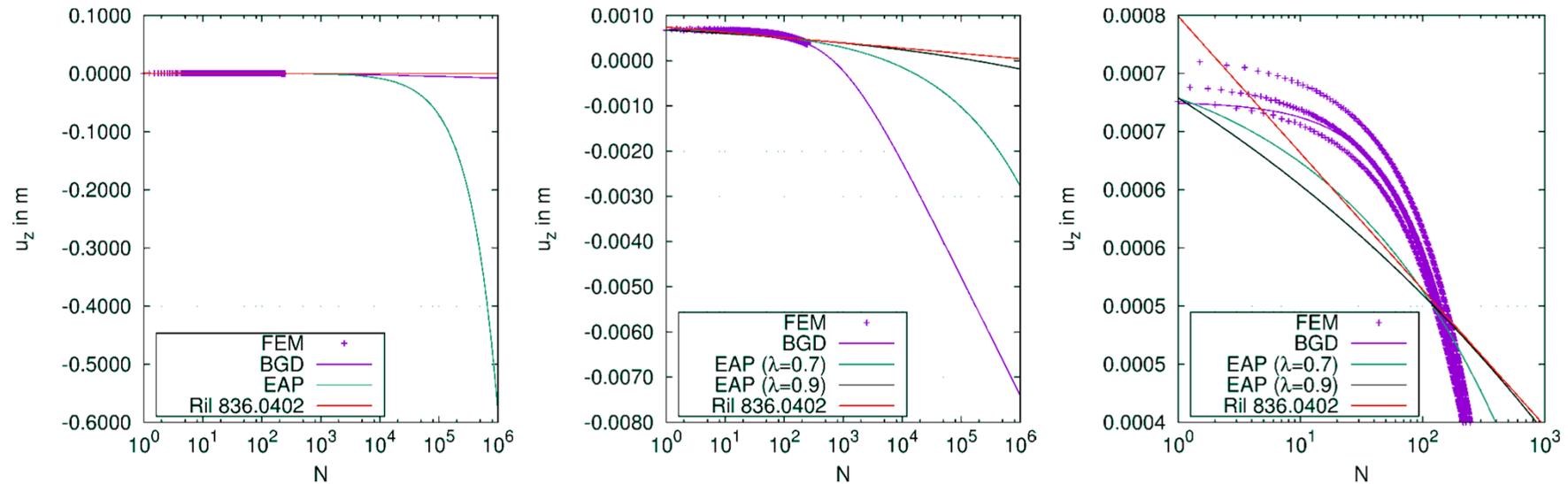
Ergebnisse ($n = 250$, $f = 1$ Hz)



Verschiebungskomponenten Fundamentmittelpunkt in Aufstandsfläche

Geotechnische Nachweise – Verformungsberechnung

Extrapolation auf Zyklenzahl entsprechend BSH-Bemessungsereignis



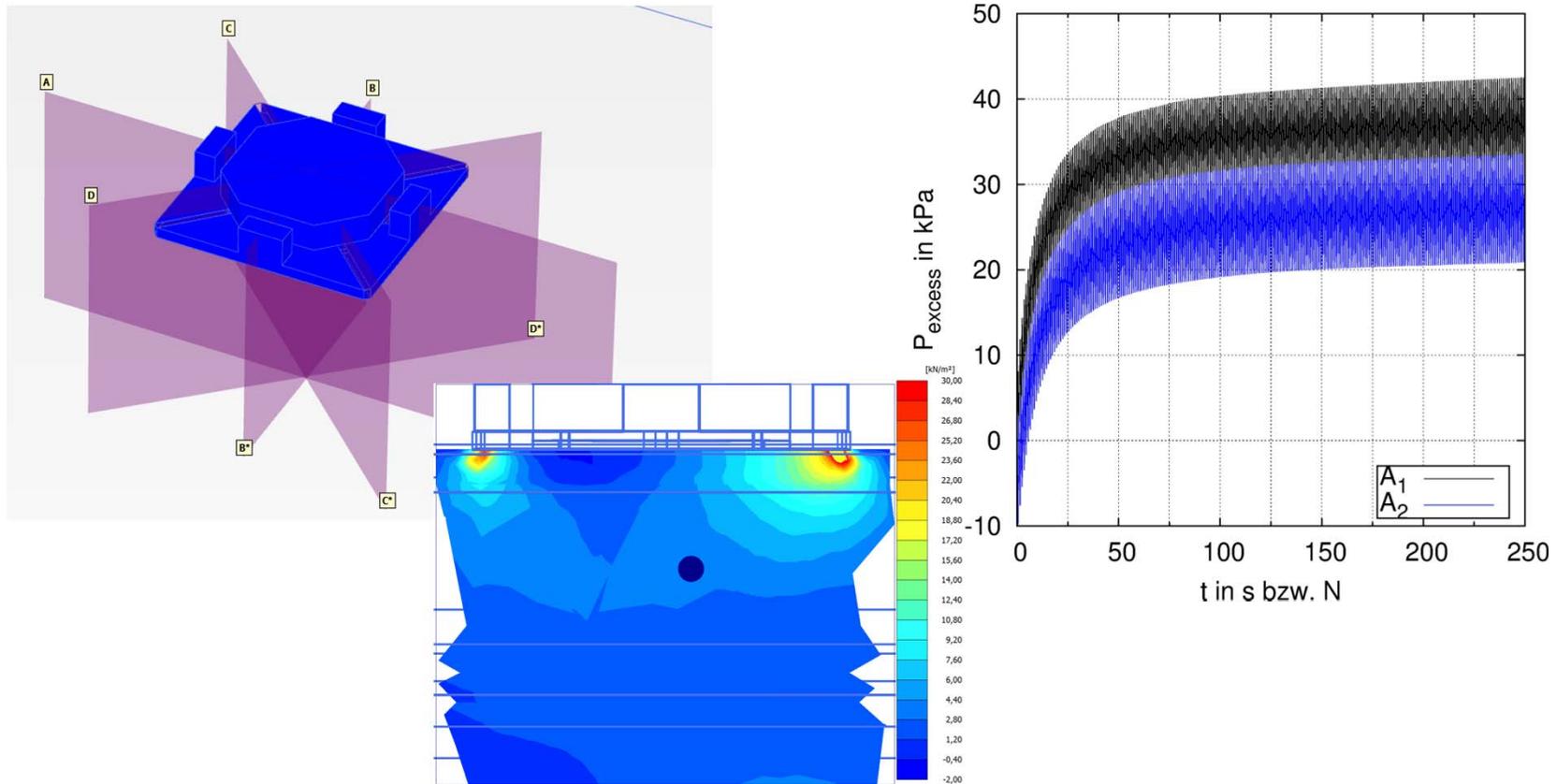
$$t = 35 \text{ h} \times 3600 \text{ s/h} = 126.000 \text{ s}$$

$$N = t f = 126.000 \text{ s} \cdot 1 \text{ Hz} = 126.000 \text{ Zyklen}$$

$$s(N) = -0,00113846 \ln(1+0.00120502 \cdot 126.000) = -5,7 \cdot 10^{-3} \text{ m} = \mathbf{6 \text{ mm}}$$

Geotechnische Nachweise – Verformungsberechnung

Porenwasserdruck-Entwicklung



Inhaltsübersicht

- Geotechnische Erkundung
- Numerische Voruntersuchungen
- Geotechnische Nachweise
- **Schlussfolgerungen**

Schlussfolgerungen ...

... müssen aus Zeitgründen entfallen ;)

Vielen Dank für Ihre geschätzte
Aufmerksamkeit!
meier@baugrund-dresden.de