ZWISCHENBERICHT/ENDBERICHT

FFG Projektnummer	846136		
Kurztitel	GeoGlueStrengthening	**FörderungsnehmerIn**	TU Wien
Bericht Nr.	1. Zwischenbericht	**Berichtszeitraum**	1. Forschungsjahr
Bericht erstellt von	Peter Nagy		

Richtwert für den Umfang: 10-20 Seiten

1. Ziele und Ergebnisse

- Wurden die dem Förderungsvertrag zugrunde liegenden Ziele erreicht? Sind diese Ziele noch aktuell bzw. realistisch? (Achtung: Änderungen von Zielen erfordern eine Genehmigung durch die FFG)
- Vergleichen Sie die Ziele mit den erreichten Ergebnissen.
- Beschreiben Sie „Highlights“ und aufgetretene Probleme bei der Zielerreichung.
- Stellen Sie dar, welchen Beitrag Ihr Projekt zur Erreichung der Ziele des Förderprogramms EraSME geleistet hat, insbesondere im Hinblick auf transnationale Aspekte.

Im ersten Forschungsjahr konnten im Forschungsantrag beschriebene Projektziele realisiert werden, die Vorbereitung und Durchführung der ersten Versuchsserie der großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen, bzw. wesentliche Schritte in der numerischen Modellentwicklung.

Im Rahmen der ersten Versuchsserie der großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen konnte ein sehr umfangreiches Messprogramm umgesetzt werden. Es ist weltweit zum ersten Mal gelungen, einen Tiefenrüttler mit einem Mess- und Datenübertragungssystem aufzurüsten und dauerhaft Messdaten aufzuzeichnen. Die aufgezeichneten Messdaten bilden eine äußerst wertvolle Grundlage für das Verstehen der Mechanismen, die während der Verdichtung mittels Tiefenrüttler im Rüttler-Boden System passieren und darüber hinaus für die Entwicklung der wissenschaftlichen Grundlagen eines Systems zur Qualitätskontrolle beim Tiefenrüttelverfahren.

Die Informationsaustausch im Zuge der Planung der großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen und die Teilnahme an der Entwicklung des Mess- und Datenübertragungssystems, bzw. die gemeinsame Abwicklung der großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen, gewähren einen bedeutenden Wissenszuwachs für die beteiligten Projektpartner im Bereich der dynamischen Tiefenverdichtung und der dynamischen Mess- und Datenübertragungstechnik.

2. Arbeitspakete und Meilensteine

2.1 Übersichtstabellen

- Erläuterung:
  Die Tabellen sind analog zum Förderungsansuchen aufgebaut
  Basistermin: Termin laut Förderungsansuchen bzw. laut Vertrag gültigem Projektplan
  Akt. Planung: Termin laut zum Zeitpunkt der Berichtslegung gültiger Planung.

Tabelle 1: Arbeitspakete

AP Nr.	Arbeitspaket Bezeichnung	Fertigstellungsgrad	Basistermin		Aktuell		Erreichte Ergebnisse / Abweichungen
			Anf.	Ende	Anf.	Ende	
AP1	Projektmanagement	30%	11/2014	10/2017	11/2014	10/2017	s. Pkt. 2.2
AP2	Voruntersuchungen	80%	11/2014	10/2016	11/2014	10/2016	s. Pkt. 2.2
AP3	Großmaßstäbliche experimentelle Untersuchungen	50%	04/2015	02/2017	04/2015	06/2017	s. Pkt. 2.2
AP4	Numerische Untersuchungen	30%	11/2014	05/2017	11/2014	05/2017	s. Pkt. 2.2
AP5	Auswertung und Interpretation	10%	11/2014	10/2017	05/2015	10/2017	s. Pkt. 2.2
AP6	Veröffentlichung	10%	10/2015	10/2017	10/2015	10/2017	s. Pkt. 2.2

Tabelle 2: Meilensteine

Meilen-stein Nr.	Meilenstein Bezeichnung	Basis-termin	Akt. Planung	Meilenstein erreicht am	Anmerkungen zu Abweichungen
M1	Versuchsabwicklungsplan	03/2015	-	06/2015	s. Pkt. 2.2
M2	Versuchsfeld	05/2015	-	06/2015	s. Pkt. 2.2
M3	Nullmessungen	07/2015	-	07/2015	s. Pkt. 2.2
M4	Großmaßstäbliche experimentelle Untersuchungen 1	10/2015	-	09/2015	s. Pkt. 2.2
M5	Interpretation der aufgezeichneten Messdaten (Versuchsserie Nr. 1)	01/2016	05/2017	-	s. Pkt. 2.2
M6	Großmaßstäbliche experimentelle Untersuchungen 2	07/2016	07/2016	-	s. Pkt. 2.2
M7	Numerisches Berechnungsmodell	09/2016	09/2016	-	s. Pkt. 2.2
M8	Parametervariationen und Sensitivitätsstudien	05/2017	05/2017	-	-
M9	Validierung und Verifizierung der Ergebnisse	02/2017	02/2017	-	-
M10	Auswertung aller Messdaten	05/2017	05/2017	-	s. Pkt. 2.2
M11	Aussagen über Bewegungsverhaltens des Rüttlers	10/2017	10/2017	-	-
M12	Zwischenbericht 1.	10/2015	10/2015	-	-
M13	Zwischenbericht 2.	10/2016	10/2016	-	-
M14	Endbericht	10/2017	10/2017	-	-

„Anmerkungen zu den Abweichungen“ siehe unter Pkt. 2.2 bei der Beschreibung des entsprechenden Arbeitspaketes.

2.2 Beschreibung der im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten

- Beschreiben Sie die im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten, strukturiert nach den Arbeitspaketen.
- Konnten die Arbeitsschritte und –pakete gemäß Plan erarbeitet werden? Gab es wesentliche Abweichungen?
- Die Beschreibung beinhaltet ebenso eine allfällige Änderung der angewandten Methodik (Achtung: Änderungen an der Methodik und wesentliche Änderungen im Arbeitsplan erfordern eine Genehmigung

durch die FFG!).

AP1 Projektmanagement

Zu Beginn des ersten Forschungsjahres wurden Kick-off Besprechungen, gesondert für den österreichischen Projektteil und für das Gesamtprojekt, an der TU-Wien organisiert und abgehalten. Im Rahmen dieser Besprechungen wurde die Zusammenarbeit im Netzwerk im Detail diskutiert und die konkreten Wege des Wissenstransfers definiert. In weiterer Folge wurden im Laufe des Forschungsjahres regelmäßige fachliche Diskussionen in kleineren Arbeitskreisen geführt.

AP2 Voruntersuchungen

Die erfolgreiche Durchführung der ersten Versuchsserie der großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen und die Gewinnung von Messdaten mit einer hohen Datenqualität waren unerlässlich für die Entwicklung der wissenschaftlichen Grundlagen eines Online-Monitoringssystems zur Qualitätsprüfung. Um die großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen erfolgreich abwickeln zu können, wurde ein außerordentlich großes Augenmerk den Vorbereitungsarbeiten geschenkt.

Literaturstudie

Thematisch relevante Voruntersuchungen und bestehende Ansätze wurden ausführlich studiert, ihre Anwendbarkeit für die vorliegende Problematik geprüft und gegebenenfalls adaptiert. Die Literaturstudie wurde von den beiden wissenschaftlichen Projektpartnern durchgeführt, wobei sich die UIBK auf die mechanische Modellbildung, die TU Wien in erster Linie auf die Wellenausbreitung im Untergrund und auf die Einsetzbarkeit geophysikalischer Untersuchungen konzentrierte.

Detaillierter Abwicklungsplan für die großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen (Meilenstein M1)

Der Abwicklungsplan für die großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen wurde zusammen mit dem Untergrunderkundungskonzept gemeinsam von TU Wien, Keller und VCE erarbeitet. Es wurden unterschiedliche Teilprobefelder mit unterschiedlichen Verdichtungsrastern definiert, damit eine möglichst große Bandbreite von Verfahrensparametern im Rahmen der großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen beobachten werden konnte.

Auslegung von Mess- und Datenübertragungskonzept (Meilenstein M1)

Im Zuge der detaillierten Diskussionen zur Abwicklung der großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen hat sich ergeben, dass das Bewegungsverhalten des ursprünglich geplanten Schleusenrüttlers mit Hilfe der verfügbaren Messsensoren messtechnisch kaum erfasst werden kann, da bei diesem Rüttlertyp der Rüttlerkörper für die Montage der Messsensorik schwer zugänglich ist. Weiters erschwert die sich im Laufe des Einbaus der Kiessäule ständig ändernde

Masse des Verdichtungsgerätes und die Komplexität des Interaktionssystems Rüttler-Verfüllmaterial-Boden die Interpretierbarkeit der Messdaten. Aus den o.g. Gründen wurde die Entscheidung getroffen, im Rahmen der ersten Versuchsserie der großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen anstelle des ursprünglich geplanten Schleusenrüttlers einen Torpedorüttler einzusetzen. Es ist zwar möglich, unter entsprechenden Randbedingungen mit Hilfe eines Torpedorüttlers Kiessäulen in einem bindigen Untergrund herzustellen, trotzdem entschied man sich, anstelle der Herstellung von Kiessäulen anstehenden locker gelagerten Kiesboden zu verdichten. Dadurch wurde das Dreikomponentensystem Rüttler-Verfüllmaterial-Boden auf ein Zweikomponentensystem Rüttler-Boden reduziert, wovon eine bessere Interpretierbarkeit der aufgezeichneten Messdaten erwartet wird.

Abbildung 1: Torpedorüttler auf der Tragraupe im Logistikzentrum der Fa. Keller in Söding

Für die erste Versuchsserie der großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen wurde ein Messsystem entwickelt, das sich auf zwei Teilsysteme aufteilen lässt:

- Messsystem auf dem Rüttlerkörper bzw. auf der Tragraupe, zur Erfassung des dreidimensionalen Bewegungsverhaltens des Verdichtungsgerätes während der Verdichtungsarbeiten.
- Messsystem zur Erfassung des Oberflächenwellenfeldes.

<u>Messsystem auf dem Rüttler bzw. auf der Tragraupe</u>

Es wurde festgelegt, die dreidimensionale Rüttlerbewegung, die Position der Unwuchtmasse und die Temperatur des Rüttlerkörpers messtechnisch zu erfassen. Das Messsystem auf dem Rüttlerkörper stellte ein sehr komplexes Problem dar, da während der Verdichtungsarbeiten mit bedeutenden mechanischen und thermischen Einwirkungen auf die Messtechnik zu rechnen war. Weiters mussten die Sensoren vor Feuchtigkeit geschützt werden, da die Verdichtung beim

Tiefenrüttlerverfahren bei laufender Wasserzugabe erfolgt. Spezielles Schirmungskonzept wurde entwickelt, da die analogen Messsignale entlang der Stromversorgung des Rüttlers (400 V, 200 A, AC) geführt werden mussten. Um eventuellen Sensorenschäden und Datenverlusten möglichst vorzubeugen, wurde das Mess- und Datenübertragungssystem an Ort und Stelle, d.h. in der Rüttlerwerkstatt der Fa. Keller in Söding, entwickelt und getestet. Da im Rüttlerkörper sehr hohe Temperaturen (sogar bis 170°C) auftreten können, wurde ein Teil der Messsensoren an der TU Wien unter Laborbedingungen getestet. Dank des sorgfältiges Planungs-, Ausführungs-, und Testprozederes überstand das Mess- und Datenübertragungssystem die Versuchsserie schadlos und ihre Funktionstüchtigkeit wurde beibehalten, womit eine hochwertige Datenqualität gewährleistet werden konnte.

Abbildung 2: Beschleunigungssensor auf dem Rüttlerkörper (li.) Test der Sensorik in der Rüttlerwerkstatt der Fa. Keller in Söding (re.)

Abbildung 3: Montage der Verkabelung des Mess- und Datenübertragungssystems

Die Messdaten wurden auf einem hinter der Fahrerkabine der Tragraupe installierten Messcomputer mit Hilfe des Brimos Wireless Systems gespeichert und gleichzeitig online übertragen, damit die Messsignale im Messcontainer in Echtzeit beobachtet und auf Plausibilität geprüft werden können. Das Brimos Wireless System ist eine Eigenentwicklung der Firma VCE, basiert auf dem Prinzip des Ambient Vibration Monitoring und findet seit vielen Jahren Anwendung im Bereich der Bauwerksdiagnose.

Weiters wurden mit dem System Brimos direkt Daten aus der Onboard-SPS-Steuerung

abgegriffen und weitergeleitet, bzw. aufgezeichnet. Dabei handelt es sich um die Stromaufnahme des Rüttlers, Einfahrtiefe sowie die Generator-Frequenz mit der der Rüttler angesteuert wird

Messsystem zur Erfassung des Oberflächenwellenfeldes

Das Oberflächenwellenfeld wurde mit Hilfe von Schwinggeschwindigkeits- und Schwingbeschleunigungsaufnehmern erfasst. Im Zuge der großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen wurden insgesamt 15 Messsensoren auf der Geländeoberfläche, in unterschiedlichen Abständen vom jeweiligen Verdichtungspunkt, aufgestellt. Die Messdaten wurden ebenfalls mit Hilfe des Brimos Wireless Systems zeitsynchron aufgezeichnet und gespeichert.

Abbildung 4: Messsystem zur messtechnischen Erfassung des Oberflächenwellenfeldes während der Verdichtungsarbeiten auf dem Probefeld

Untergrunderkundung auf dem Probefeld (Meilenstein M2)

Für die Untergrunderkundung auf dem Probefeld wurden folgende Teilziele definieret:

- Untergrunderkundung zur Auswahl des geeigneten Probefeldes
- Ausführliche Untergrunderkundung auf dem ausgewählten Probefeld zur
    - Verdichtungskontrolle; Vergleich der Ergebnisse der Untergrunderkundung vor und nach der Verdichtung
    - Ermittlung maßgeblicher Parameter für die numerischen Modellierung

Die wichtigsten Anforderungen an das Versuchsfeld für die großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen waren folgende:

- Entsprechende Untergrundsituation:
  locker gelagerter sandiger Kies, bis mindestens 7 m Tiefe unter GOK
- Ausreichend große ebene Fläche für die geplanten Verdichtungspunkte und für das Messsystem zur Erfassung des Oberflächenwellenfeldes bzw. für die Baustelleneinrichtung
- Erschütterungsarme Umgebung, um die messtechnische Erfassung des

Oberflächenwellenfeldes während der Verdichtungsarbeiten zu ermöglichen

Im Rahmen der Suche nach einem geeigneten Probefeld wurden in erster Linie Liegenschaften der Firma Keller, im speziellen das Logistikzentrum in Söding bewertet. Nachdem dort die o.g. Anforderungen nicht restlos erfüllt werden konnten, wurden weitere mögliche Standorte untersucht. Anhand der Ergebnisse der Voruntersuchungen wurde im März 2015 die Kiesgrube der Fa. Cemex in Fisching (Steiermark) für das Versuchsfeld zur Durchführung der großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen ausgewählt.

Auf dem Versuchsfeld wurde von der Fa. Keller ein ausführliches Untergrunderkundungsprogramm durchgeführt. Die Untergrunderkundung auf dem Probefeld erfolgte mit Hilfe von

- Kernbohrungen: 2 Stk. bis 15,0 m, 1 Stk. bis 20,0 m Tiefe
- Rammsondierungen: 30 Stk. bis zu 15,0 m Tiefe

Abbildung 5: Untergrunderkundung auf dem Probefeld; Kernbohrung (links) und Rammsondierung (rechts)

AP3 Großmaßstäbliche experimentelle Untersuchungen

Nullmessungen am frei schwingenden Rüttler (Meilenstein M3)

Unmittelbar vor Ausführung der Verdichtungsversuche auf dem Probefeld wurden im Logistikzentrum der Fa. Keller in Söding sog. „Nullversuche“ durchgeführt. Der mit der Messsensorik aufgerüsteter Torpedorüttler wurde auf eine Tragraupe montiert und der Rüttler in der Luft (ohne Bodenkontakt) in Schwingung versetzt.

Abbildung 6: Test des Mess- und Datenübertragungssystems auf der Tragraupe (li.), Beobachtung der ersten Messsignale auf dem Messcomputer auf der Tragraupe

Im Zuge der „Nullversuche“ konnte die Funktionsfähigkeit des Mess- und Datenübertragungssystems geprüft und das Bewegungsverhalten des frei schwingenden Rüttlers bei unterschiedlichen Rüttelfrequenzen messtechnisch erfasst werden

Großmaßstäbliche experimentelle Untersuchungen 1 (Meilenstein M4)

Nach Feststellung die Funktionsfähigkeit des Mess- und Datenübertragungssystems im Logistikzentrum der Fa. Keller in Söding wurde die Tragraupe mit dem Tiefenrüttler nach Fisching zum Versuchsfeld transportiert.

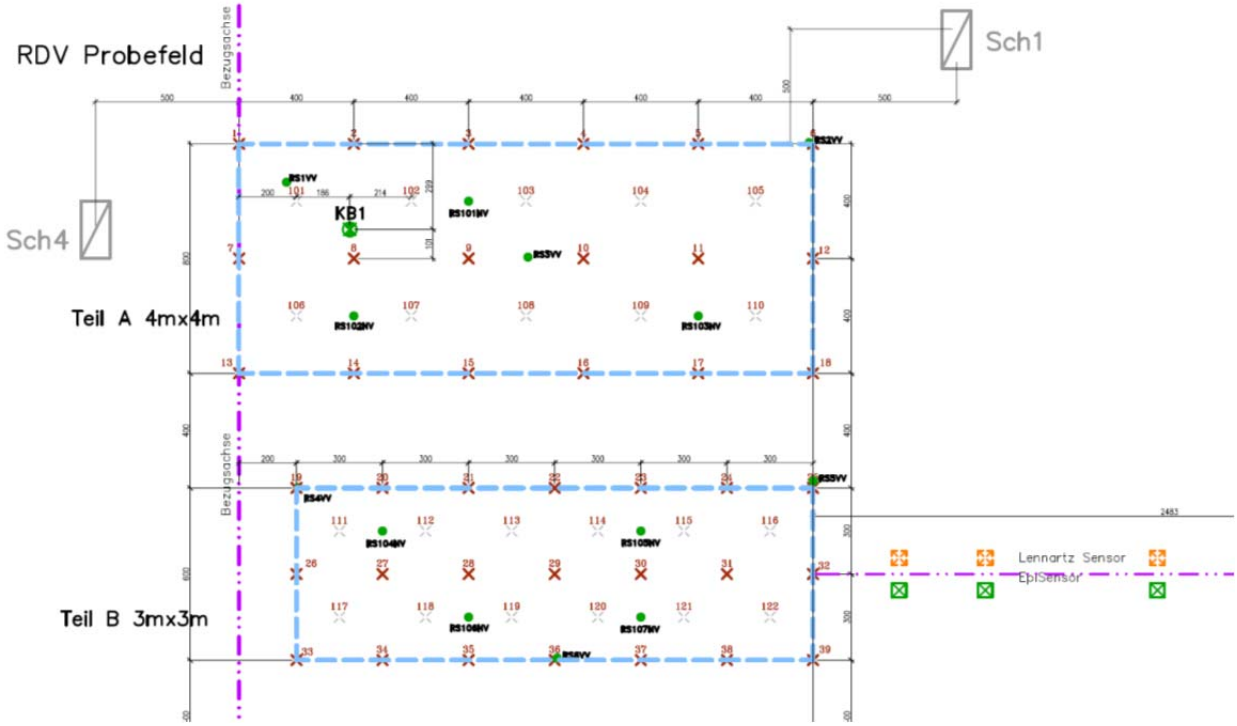


Abbildung 7: Austeilungsplan der Verdichtungspunkte, der Untergrunderkundungsmaßnahmen und des Oberflächenmesssystems (Auszug)

Auf dem Versuchsfeld wurde das Mess- und Datenübertragungssystem auf der Tragraupe in Betrieb genommen, die Schwinggeschwindigkeits- und Schwingbeschleunigungsaufnehmer auf der Geländeoberfläche installiert, das Brimos Wireless System angeschlossen und die online-Übertragung in den Messcontainer hergestellt. Es konnte anschließend mit den Verdichtungsarbeiten begonnen werden. Im Rahmen der großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen wurden auf dem Versuchsfeld insgesamt 140 Verdichtungspunkte, gemäß dem Austeilungs- und Ablaufplan hergestellt. Ein Auszug aus dem Austeilungs- und Ablaufplan ist auf Abbildung 7 dargestellt. Der Austeilungs- und Ablaufplan wurde von der TU Wien sowie von Keller und VCE im Zuge der detaillierte Planung der großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen erarbeitet.

Abbildung 8: Das Probefeld mit dem Tiefenrüttler, Mess- und Mannschaftscontainer während der Verdichtungsarbeiten

Das Messsystem zur Erfassung des Oberflächenwellenfeldes wurde in zwei Teile gegliedert. Die Schwinggeschwindigkeits- und Schwingbeschleunigungsaufnehmern wurden in der unmittelbaren Nähe des Verdichtungspunktes (Nahfeldsensoren) bzw. auch in größerer Entfernung (Fernfeldsensoren) aufgestellt. Die Fernfeldsensoren standen während der gesamten Versuchsserie auf fixen Positionen, die Nahfeldsensoren wurden versetzt, und stets in gleicher Nähe des bearbeiteten Verdichtungspunktes aufgestellt.

Abbildung 9: Inbetriebnahme des Brimos Wireless Systems (li.) und Aufstellung der Messsensoren auf die Geländeoberfläche (re.)

Die Messsignale wurden in Echtzeit im Messcontainer angezeigt und laufend beobachtet, um eventuelle Störungen des Messsystems rechtzeitig erkennen zu können. Ausgewählte Messsignale wurden an Ort und Stelle vorausgewertet und das Messprogramm anhand der neuen Erkenntnisse laufend adaptiert.

Abbildung 10: Beobachtung der Messsignale im Messcontainer

Es wurden Verdichtungspunkte teilweise mit vorgegebenen, unüblichen Verfahrensparametern hergestellt. Während der Verdichtungsarbeiten wurden die Herstellungsparameter, sowie Rüttlerfrequenz, Eindring- und Ziehgeschwindigkeit, Anpressdruck, Menge des zugegebenen Spülwassers, variiert und die Auswirkung der Änderung auf die dreidimensionale Rüttlerbewegung erfasst sowie weitere Verfahrensparameter, wie z.B. die Stromaufnahme des Rüttlermotors, beobachtet.

Ein Teil der Verdichtungspunkte wurde ohne jegliche Vorgabe für die Verfahrensparameter standardmäßig nach Ermessen des Maschinisten hergestellt. Die Verdichtungsarbeiten wurden von einem erfahrenen Gerätefahrer der Firma Keller ausgeführt und wiederum die dreidimensionale Rüttlerbewegung und die weiteren Verfahrensparameter in standardmäßigem Betrieb messtechnisch erfasst.

Darüber hinaus wurden im Rahmen der Versuchsserie Steuerungsversuche unternommen, wobei

ein wesentlicher Verfahrensparameter, der Vorlaufwinkel der Unwuchtposition, weltweit zum ersten Mal manuell gesteuert werden konnte.

Abbildung 11: Durchführung der Verdichtungsarbeiten

Die Verdichtungsversuche nahmen auf dem Probefeld insgesamt 12 Tage in Anspruch. Es konnten alle geplanten Verdichtungspunkte hergestellt werden.

Nach dem Abschluss der Verdichtungsarbeiten wurden Rammsondierungen zur Verdichtungskontrolle durchgeführt, um einen Vergleich der Sondierergebnisse vor und nach der Verdichtung zu ermöglichen.

Die Überprüfung des Verdichtungserfolgs erfolgte auch mit Hilfe von seismischen Drucksondierungen (SCPT) bzw. geophysikalischen Untersuchungen auf Basis von ambienten Messungen.

Die Untersuchungen mit der seismischen Drucksonde wurden von der Firma Fugro Budapest durchgeführt. Das Untersuchungsprinzip bei der Seismischen Drucksondierung entspricht der Downhole-Seismik. Die Durchführung seismischer Messungen erfolgte auf dem Versuchsfeld in Tiefenstufen von 1,0 m.

Im Zuge der geophysikalischen Untersuchungen (ambiente Messungen) wurden 6 Stück Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer auf der Geländeoberfläche in unterschiedlich großen Kreisen aufgestellt und das seismische Hintergrundgeräusch aufgezeichnet. Die Messungen wurden an den gleichen Stellen vor und nach den Verdichtungsarbeiten durchgeführt. Die Sensoraufstellungen wurden anhand von Literaturangaben geplant und im Rahmen von Vorversuchen validiert.

Abbildung 12: seismische Drucksondierungen (SCPT) (li.) und ambiente Messungen (re.) auf dem Probefeld

Die Ergebnisse der seismischen Drucksondierungen bzw. der ambienten Messungen werden zum Vergleich der dynamischen Eigenschaften des verdichteten und unverdichteten Bodens herangezogen. Im Zuge der Datenauswertung wird die Wellenlaufgeschwindigkeit im verdichteten und im unverdichteten Bodenbereich gegenübergestellt und daraus auf die Veränderung der (dynamischen) Bodeneigenschaften zufolge der Rütteldruckverdichtung geschlossen.

Großmaßstäbliche experimentelle Untersuchungen 2 (Meilenstein M6)

Die zweite Versuchsserie der großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen findet voraussichtlich im Frühjahr/Sommer 2016 statt.
Im Rahmen der zweiten Versuchsserie werden verklebte Kiessäulen in bindigem Untergrund hergestellt.
Für die zweite Versuchsserie wurde bereits ein Versuchsfeld ausgewählt sowie die Anwendungsmöglichkeiten unterschiedlicher Zugabematerialien untersucht. Es ist geplant, im Rahmen der zweiten Versuchsserie 30 verklebte Schottersäulen herzustellen. Erste Versuche mit als typisch zu bezeichnenden Einbaumaterialien haben dabei gezeigt dass das Material drucklos, d.h. nur unter Einwirkung der Schwerkraft, bis zu 45 cm in den Boden eindringt. (Abbildung 13)

Abbildung 13: Versuchsanordnung zum statischen Eindringverhalten

Unter dem Grundwasserspiegel reduziert sich diese Eindringtiefe drastisch.
Es wird überlegt die Verklebung auf dem Probefeld auf zwei unterschiedliche Arten durchzuführen. Einerseits sollen fertige Kiessäulen erst nachträglich injiziert bzw. ein Kleber-Kies-Gemisch direkt eingebaut werden. Wie und an welcher Stelle des Schleusenrüttlersystems die Zugabe von Kleber erfolgen kann wird noch in Vorversuchen gemeinsam mit den Projektpartnern DMI und DPH geklärt. Ein Konzept für den Einbau direkt an der Spitze wurde grundsätzlich erstellt, kann aber erst nach Festlegung des einzubauenden Klebers endgültig umgesetzt werden.
Vorerst wurden nur Laboruntersuchungen zum Thema Materialzertrümmerung durchgeführt.

AP4 Numerische Untersuchungen

Aufbau

Zur Anwendung kommt das Finite Elemente (FE) Programm Abaqus 6.13-2. Der Boden wird als einphasiges homogenes isotropes Kontinuum gemäß der repräsentativen Volumen-Methode angesehen. Die räumliche Ausdehnung ist mit 15 m in radialer Richtung mit einer Dicke von 0.5 m angenommen. Die FE Diskretisierung erfolgt durch ein strukturiertes Netz mit 6603 achtknotigen Elementen (C3D8) mit insgesamt 200 Knoten an der Innenseite. In Abbildung 14 ist ein Ausschnitt des Boden-Rüttler-Interaktionssystems dargestellt. Der Rüttler wird als Starrkörper modelliert und ist in dieser Abbildung mit roter Farbe hinterlegt.

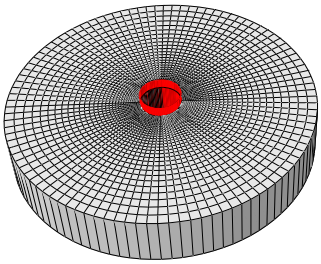


Abbildung 14: FE Diskretisierung des Boden-Rüttler Interaktionssystems (Ausschnitt)

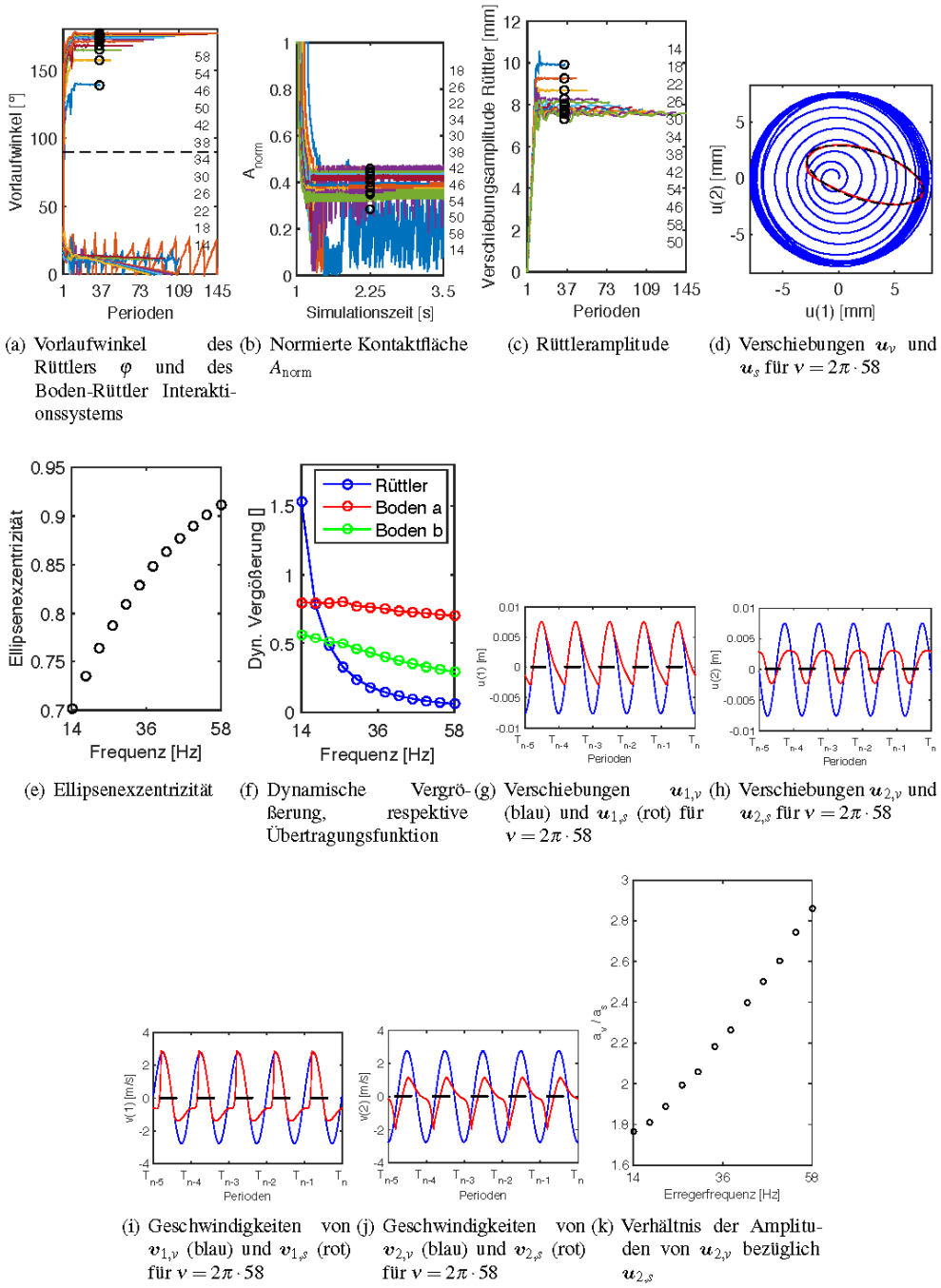
Frequenzvariation

In Abbildung 15 sind Ergebnisse zufolge einer Parameterstudie durch Variation der Erregerkreisfrequenz $\nu = 2\pi \cdot (14 + 4i)$, mit $i = 0, 1, \ldots, 11$ dargestellt. Der Boden wird als linear elastisch mit einem Elastizitätsmodul von 20 MPa und einer Querdehnzahl von $\nu = 1/3$ modelliert. Die Interpretation dieser Ergebnisse kann aus dem internen Zwischenbericht entnommen werden.

Mechanische Modellbildung

Als mechanische Modellbildung ist die Abbildung eines in der Natur zu beobachtendes Phänomen in ein abstraktes Modell unter Berücksichtigung physikalischer Grundgesetze zu verstehen. Dabei

ist es im Allgemeinen ausreichend, nur die für das jeweilige Problem wesentlichen Effekte zu identifizieren und diese in einem vereinfachten mechanischen Modell abzubilden. Die maßgebenden Effekte sind jedoch a priori unbekannt. Dabei werden Elemente wie Punktmassen, starre elementare Körper, Federn und Dämpfer benutzt und miteinander so konfiguriert, dass die Problemstellung gelöst werden kann



(a) Vorlaufwinkel des Rüttlers φ und des Boden-Rüttler Interaktionssystems

(b) Normierte Kontaktfläche A_{norm}

(c) Rüttleramplitude

(d) Verschiebungen $\boldsymbol{u}_v$ und $\boldsymbol{u}_s$ für $\nu = 2\pi \cdot 58$

(e) Ellipsenexzentrizität

(f) Dynamische Vergrößerung, respektive Übertragungsfunktion

(g) Verschiebungen $\boldsymbol{u}_{1,v}$ (blau) und $\boldsymbol{u}_{1,s}$ (rot) für $\nu = 2\pi \cdot 58$

(h) Verschiebungen $\boldsymbol{u}_{2,v}$ und $\boldsymbol{u}_{2,s}$ für $\nu = 2\pi \cdot 58$

(i) Geschwindigkeiten von $\boldsymbol{v}_{1,v}$ (blau) und $\boldsymbol{v}_{1,s}$ (rot) für $\nu = 2\pi \cdot 58$

(j) Geschwindigkeiten von $\boldsymbol{v}_{2,v}$ (blau) und $\boldsymbol{v}_{2,s}$ (rot) für $\nu = 2\pi \cdot 58$

(k) Verhältnis der Amplituden von $\boldsymbol{u}_{2,v}$ bezüglich $\boldsymbol{u}_{2,s}$

Abbildung 15: Numerische Ergebnisse zufolge Erregerfrequenzvariation

Rüttlermodell

Es wird das in Abbildung 16 dargestellte Modell für die Bewegung des Rüttlers angenommen.

Gemäß Abbildung 15 vollführt der Rüttler zufolge der Zentrifugalkraft eine kreisförmige Bewegung. Der Rüttler steht also permanent in Kontakt mit dem Boden und „streicht“ an der Kontaktfläche zwischen Boden und Rüttler. Das mechanische Modell in Abb. 3 kann analytisch gelöst werden. Durch die Verwendung des Kegelmodells nach Wolf (Wolf, 1994) kann das Feder-Dämpfer-System mit denselben Eingangsdaten wie aus der FE Berechnung eingegeben werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 17 dargestellt.

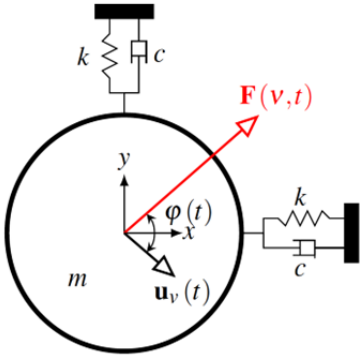
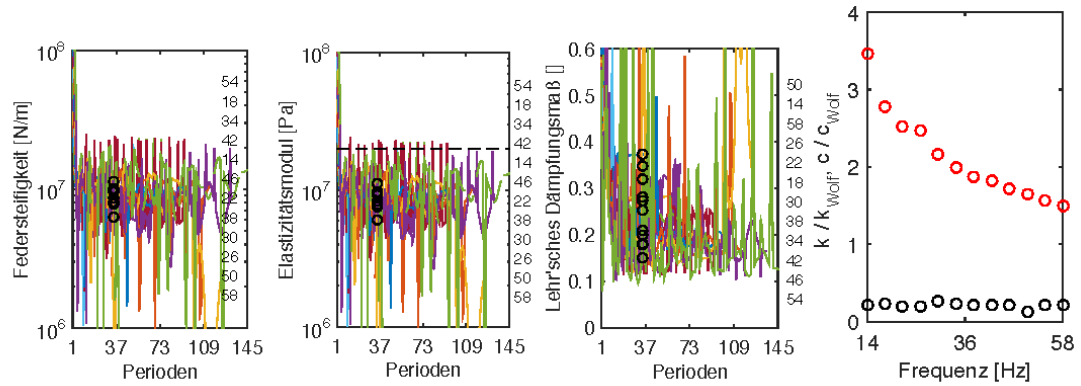


Abbildung 16: Ebenes mechanisches Modell

Durch die analytische Lösung der Bewegungsgleichung kann für dieses mechanische Modell eine eindeutige Invertierung auf die Feder- und Dämpferparameter angegeben werden. So kann in Analogie zu Fellin et al. (2000) aus gemessenen Datensätzen die Evolution der Federsteifigkeit k und der Dämpfung ζ zurückgerechnet werden. Diese Analyse wird mit den numerischen Datensätzen durchgeführt und die Ergebnisse sind ebenfalls in Abb. 4 dargestellt.

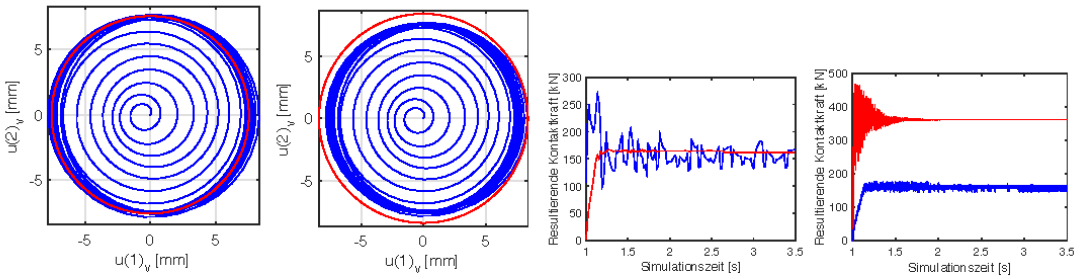


(a) Federsteifigkeit k zufolge inverser Modellierung

(b) Elastizitätsmodul, berechnet aus Federsteifigkeit k mittels Kegelmodel nach *Wolf*

(c) Lehr'sches Dämpfungsmaß ζ zufolge inverser Modellierung

(d) Verhältnis der Federsteifigkeit k und Lehr'scher Dämpfung ζ zufolge inverser Modellierung und nach dem Kegelmodell nach *Wolf* k_{Wolf} (schwarz) und ζ_{Wolf} (rot).



(e) Verschiebung $\boldsymbol{u}_\nu$ zufolge numerischer Simulation (blau) und mittels inverser Modellierung (rot) für $\nu = 2\pi \cdot 58$

(f) Verschiebung $\boldsymbol{u}_\nu$ zufolge numerischer Simulation (blau) und mittels Kegelmodell Modell nach *Wolf* (rot) für $\nu = 2\pi \cdot 58$

(g) Reaktionskraft zufolge numerischer Simulation (blau) und mittels inverser Modellierung (rot) für $\nu = 2\pi \cdot 58$

(h) Reaktionskraft zufolge numerischer Simulation (blau) und mittels Kegelmodell Modell nach *Wolf* (rot) für $\nu = 2\pi \cdot 58$

Abbildung 17: Ergebnisse zufolge inverser Modellierung bzw. Modellierung der Rüttlerbewegung

AP5 Auswertung und Interpretation

Interpretation der aufgezeichneten Messdaten (Meilensteine M5 und M10)

Im ersten Forschungsjahr beschränkte sich das Arbeitspaket „Auswertung und Interpretation“ in erster Linie auf die im Zuge der Test- und Vorversuchen aufgezeichneten Messdaten.

AP6 Veröffentlichung

Der aktuelle Stand des Forschungsprojektes bzw. ausgewählte Auswertungsergebnisse wurden regelmäßig im Rahmen von Dissertantenseminaren an der TU Wien und an der UIBK präsentiert und diskutiert.

2.3 Änderungen im weiteren Projektverlauf

- Gibt es Veränderungen? Welche Auswirkungen haben diese? Wie muss die Planung adaptiert werden?

Anwendung eines Torpedorüttlers

Aus den unter Pkt. 2.2 genannten Gründen (Anwendung eines Torpedorüttlers anstelle eines Schleusenrüttlers) wurde für die Untersuchung der Rüttlerbewegung nach einem Versuchsfeld gesucht, in dem der Verdichtungsvorgang im locker gelagerten Kiesboden untersucht werden kann. Die Entscheidung für die Anwendung des Torpedorüttlers wirkt sich auf die Organisation der Versuche aus, aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen kann das Bewegungsverhalten des Rüttlers und die Bodenverklebung nicht auf ein und demselben Probefeld untersucht werden. Aus dem o.g. Gründen wird das Untersuchungsprogramm daher wie folgt aufgeteilt:

- Untersuchung des Bewegungsverhaltens des Rüttlers (österreichischer Projektteil)
  Termin: Juli - August 2015
  Verdichtung von locker gelagertem Kies mit Hilfe eines Torpedorüttlers, Untersuchung des Bewegungsverhaltens
  (Die erste Versuchsserie der großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen wurde erfolgreich abgeschlossen.)
- Untersuchung der Verklebung von Schottersäulen (deutscher Projektteil)
  Termin: voraussichtlich Frühjahr/Sommer 2016
  Herstellung und Verklebung von Rüttelstopfsäulen im bindigen Untergrund mit Hilfe eines Schleusenrüttlers.

Einsatz von seismischen Untergrunderkundungsverfahren

Im Zuge der Planung der ersten Versuchsserie der großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen wurde aufgrund des zu erwartenden hohen Erkenntnisgewinns beschlossen, im Zuge der Untergrunderkundung auf dem Probefeld seismische Untergrunderkundungsverfahren einzusetzen. Durch die seismischen Untergrunderkundungsverfahren (seismische Drucksondierungen und ambiente Messungen) kann ein großer Teil der ursprünglich geplanten Laboruntersuchungen ersetzt werden.

Bei der Fa. VCE stand ein Teil der erforderlichen Messausrüstung für die seismische Untergrunderkundung zur Verfügung. Die TU Wien beschloss, aus eigenen Mittel die entsprechende Messausrüstung anzuschaffen. Die beiden Projektpartner haben vor, das im gegenständigen Forschungsprojekt eingesetzte Messsystem auch im Rahmen der zukünftigen gemeinsamen Forschungstätigkeit einzusetzen.

3. Projektteam und Kooperation

- Gibt es wesentliche Veränderungen im Projektteam (interne Schlüsselmitarbeiter und Drittleister)?
- Beschreiben Sie die Zusammenarbeit im Konsortium.
- Gehen Sie auf Änderungen in der Arbeitsaufteilung ein. Gibt es Auswirkungen auf die Kosten- / Finanzierungsstruktur und die Zielsetzung?

Änderungen im Projektteam

Die Fa. Fugro Budapest wurde als Drittleister ins Forschungsprojekt zur Ausführung von seismischen Drucksondierungen (SCPT) im Rahmen der großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen eingebunden. Die SCPT Untersuchungen wurden von der Österreichischen Gesellschaft für Geomechanik (ÖGG) gefördert.

Zusammenarbeit im Konsortium

Die Schaffung der Grundlagen für das System, welches die Qualitätssicherung für die Rüttelstopfverdichtung während der Verdichtung ermöglicht, erfolgt von den österreichischen Projektpartnern. Von den deutschen Partnern werden für die Säulenverklebung notwendige Kleber, viskose Additive zur Netzbildung, Injektionstechnik, praktische Umsetzung und experimentelle bzw. theoretische Grundlagen zur Erhöhung der Tragfähigkeit von Rüttelstopfsäulen mittels Injektionsmittel auf Kunststoffbasis entwickelt. Die Entwicklungen werden im Rahmen großmaßstäblicher experimenteller Untersuchungen verifiziert, wobei die entsprechende Gerätetechnik und Personal von der Fa. Keller zur Verfügung gestellt wird.

Veränderungen im Projektteam und in der Arbeitsaufteilung

TU Wien: DI Viktoria Ostermann ist voraussichtlich bis Ende 2016 karenziert. Die für Fr. Ostermann vorgesehene Forschungstätigkeit wurde in erster Linie von DI Olja Barbir und von DI Peter Nagy übernommen. DI Dr. Cătălin Căpraru wurde aufgrund seiner langjährigen Erfahrung in allgemeiner Bodendynamik und in dynamischer Bodenverdichtung auch an der TU Wien in das Forschungsprojekt involviert. Herr Căpraru ist Mitarbeiter sowohl der Fa. VCE, als auch der TU Wien.

UIBK: Für die im Projektantrag nicht namentlich genannten Mitarbeiter (Junior Researcher) kamen die beiden Universitätsassistenten DI Johannes Burtscher und DI Maximilian Schmitter zum Einsatz.

Keller: Die Bauleitung (DI Astrid Kaineder) wurde durch DI Vincent Winter unterstützt. Weiters wurde Dr. Kummerer in die Konzernzentrale nach Offenbach berufen. Seine Agenden übernimmt

Dr. Alexander Zöhrer

VCE: Frau Anna Bosi hat die Firma VCE verlassen, weshalb Frau Elisabetta Pistone ihre Agenden übernimmt. Frau Pistone war bereits vorher in das Forschungsprojekt involviert, weshalb die Übergabe reibungslos verlief.

Die o.g. Veränderungen haben keinen wesentlichen Einfluss auf die Kosten- / Finanzierungsstruktur und die Zielsetzung.

4. nur Endbericht: Wirtschaftliche und wissenschaftliche Verwertung

- Beschreiben Sie die bisherigen Verwertungs- und / bzw. Weiterverbreitungsaktivitäten. Ist eine Verwertung möglich?
- Listen Sie Publikationen, Dissertationen, Diplomarbeiten sowie etwaige Patentmeldungen, die aus dem Projekt entstanden sind, auf.
- Welche weiterführenden F&E-Aktivitäten sind geplant?
- Zusammenfassung für Veröffentlichung (optional)

5. Erläuterungen zu Kosten & Finanzierung

- Die Abrechnung ist als eigene Datei im Excel-Format hochzuladen. Die Verwendung der von der FFG zur Verfügung gestellten Vorlage ist verpflichtend. Beachten Sie den Kostenleitfaden: www.ffg.at/Kostenleitfaden bzw. Ausschreibungsdokumente
- Abweichungen vom Kostenplan sind an dieser Stelle zu beschreiben und zu begründen.
- Ist mit Änderungen am Kostenplan bis zum Projektende zu rechnen? Wenn ja, erläutern Sie diese. (Achtung: Größere Änderungen sind genehmigungspflichtig)

TU Wien: Die im Kapitel 3. genannten Änderungen im Projektteam bewirken eine entsprechende Änderung des Kostenplanes der weiteren Forschungsjahre.

UIBK: Auf Grund der aufwendigen numerischen Simulationen wurde ein Hochleistungscomputer (High-Performance Workstation) am 1.9.2015 angeschafft, der zu 90% für diese Berechnungen herangezogen wird. Somit ergeben sich höhere Abschreibungskosten als veranschlagt. Alle bis zum 31.8.2015 eingesetzten Rechner waren bereits abgeschrieben.

Die Personalkosten liegen etwas über der Kalkulation, hingegen für Univ.-Prof. Christoph Adam unterhalb der veranschlagten Kalkulation.

Für die spätere Gegenüberstellung zwischen experimentellen und numerischen Untersuchungen (AP5) war es notwendig, dass Maximilian Schmitter an den Versuchsreihen bei den Großversuchen in Fisching teilnahm.

Keller: Im firmeneigenen Logistikzentrum Kellers waren die vorhandenen Flächen, bzw der Untergrund, für die tatsächlich ausgeführten großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen nicht geeignet. Aus diesem Grund musste ein Versuchsfeld gemietet werden, wodurch zum Zeitpunkt der Antragsstellung unbekannte Mietkosten anfielen.

Die Änderungen bei den Projektmitarbeitern bewirken eine kostenneutrale Umschichtung der Kosten.

VCE: Die Fa. VCE konnte ihren Forschungsbeitrag ohne nennenswertes Umdisponieren im geplanten Kostenrahmen abarbeiten.

Zum Zeitpunkt der Berichtstellung sind in Zukunft keine wesentlichen Änderungen am Kostenplan vorgesehen.

6. Projektspezifische Sonderbedingungen und Auflagen

- Gehen Sie auf projektspezifische Sonderbedingungen und Auflagen (laut §6 des Förderungsvertrags) ein, sofern diese im Förderungs- bzw. Werkvertrag vereinbart wurden.

A1.1 Projektspezifische Sonderbedingungen und Auflagen

A1.2 Erfüllung und Umsetzung der projektspezifischen Sonderbedingungen und Auflagen

TU Wien: Die Auflagen wurden vor Ausfertigung des Förderungsvertrags erfüllt

Keller: Die Auflagen werden bei der Abrechnung berücksichtigt.

7. Meldungspflichtige Ereignisse

Gibt es besondere Ereignisse rund um das geförderte Projekt, die der FFG mitzuteilen sind (siehe auch „Transnational Programme EraSME, 14th Call - FFG-spezifischer Leitfaden für AntragstellerInnen“ 7.6), z.B.

- Änderungen der rechtlichen und wirtschaftlichen Einflussmöglichkeiten beim Förderungsnehmer
- Insolvenzverfahren
- Ereignissen, die die Durchführung der geförderten Leistung verzögern oder unmöglich machen
- Weitere Förderungen für dieses Projekt

Die SCPT Untersuchungen wurden von der Österreichischen Gesellschaft für Geomechanik (ÖGG) gefördert. Die Fördersumme beträgt 3 000 EUR

Die TU Wien schaffte ein dynamisches Messsystem an, das im Rahmen der ambienten Messungen und bei der messtechnischen Erfassung des Oberflächenwellenfeldes eingesetzt wurde. Die Investitionssumme betrug 105 500 EUR