

Projekt: „Experimentelle Untersuchung zur Eislinsenbildung in gefrorenen Böden“ (CU 363/6-1)

Antragstellende Person: Herr Professor Dr.-Ing. Roberto Cudmani, München

Gutachten 1:

„Qualität des Vorhabens

Der Anspruch des gesamten Vorhabens bestehend aus 2 Phasen ist sehr ambitioniert. In der hier beantragten ersten Phase liegt der Schwerpunkt auf der Entwicklung eines äußerst komplexen Versuchsstands. Dieser beruht auf der Kombination neuartiger Messsysteme bei der Untersuchung der Eislinsenbildung mit Fokus auf die Messung der bei der Eislinsenbildung relevanten Saugspannungen. Die im Antrag angestrebten Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen würde die Erkenntnisse sowohl beim Einsatz der Bodenvereisung als Bauhilfsmaßnahme als auch für die Beurteilung von Frostschäden an der Infrastruktur (Verkehrswege, Pipelines etc.) maßgeblich erweitern.

Weiter soll mit dem Vorhaben in einer zweiten Phase ein numerisches Modell entwickelt und kalibriert werden. Leider wird hier nicht näher auf die Vorgehensweise und die Art der Modellierung eingegangen, außer dass auf das vom Antragsteller entwickelte bzw. modifizierte Stoffgesetz basierend auf einem THM Modell hingewiesen wird. Leider wird nicht spezifiziert welche maßgeblichen Parameter dort einfließen.

Die Qualität des Vorhabens bezüglich der ‚ersten Phase‘ würde ich als sehr gut bewerten. Die beschriebenen Hauptziele der Arbeit (2-5) stellen einen erheblichen Beitrag zur wissenschaftlichen Kenntnislage zur Thematik dar. Die Anbindung der zweiten Phase – auch wenn diese zeitlich nachläuft, wäre eine logische Konsequenz bedürfte allerdings einer wesentlich besseren und detaillierteren Beschreibung der Methodik und der zu berücksichtigten Mechanismen. Die numerische Modellierung der Eislinsenbildung ist ein sehr umfangreiches Thema an dem weltweit mit nur wenig Erfolg und in kleinen Schritten gearbeitet wird und daher meines Erachtens nach nicht in einer Phase 2 in der vorgesehenen Zeit möglich sein wird.

Ziele und Arbeitsprogramm

Der wesentliche Bestandteil und die Voraussetzung der Erreichung der beschriebenen Forschungsziele des Antrages besteht aus der Entwicklung eines komplexen Versuchsaufbaus. Dieser besteht aus der Kombination bereits existierender Bestandteile (Suction measurements, Kameras, fiber optics) die in bestehenden Versuchsgeräten nicht zusammen eingesetzt wurden. Für die Entwicklung und das Austesten der Versuchstechnik wird ein Jahr veranschlagt was in meinen Augen sehr optimistisch erscheint. Die im Antrag beschriebenen Ziele 2-5 überzeugen wobei gerade der Zusammenhang zwischen der Bodengefrierkurve mit der Saugspannungs-Sättigungskurve hervorzuheben ist welcher ohne das neue Versuchsgerät mit Hilfe anderer Partner bearbeitet wird. Als Schwäche muss der starke Zeitdruck durch die vorgesehene Anzahl der Versuche gewertet werden. Auf die Frage der Herstellung der Proben und die Möglichkeit der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wird im Antrag leider nicht näher eingegangen. Die Ausführungen zum Umgang mit den erhaltenen Daten sind ausreichend. Der Nutzen hängt vor Allem von den zur Verfü-

gung gestellten Metadaten ab auf die nicht weiter eingegangen wird. Ein permanenter Mitarbeiter der TU München wird als verantwortlicher für den Umgang mit den Daten benannt, so dass zumindest für die nächsten 20 Jahre ein Ansprechpartner zur Verfügung stehen sollte.

Qualifikation der/des Antragstellenden

Die Qualifikation des Antragstellers ist gut. Er beschäftigt sich mit der Frage der Baugrundvereisung seit geraumer Zeit durch seine Beteiligung an diversen Großprojekten und hat seine Kenntnisse in herausragenden Fachzeitschriften (e.g. Geotechnique) veröffentlicht.

Arbeitsmöglichkeiten und das wissenschaftliche Umfeld

Das Forschungszentrum Geotechnik an der TU München, das mit dem Lehrstuhl des Antragstellers verbunden ist stellt ein ideales Umfeld für die angestrebten Arbeiten dar.

eindeutiges Votum

Ich würde einer Förderung der ersten Phase zustimmen. Allerdings erscheint mir, wie vorher schon beschrieben, ein Zeitraum von drei Jahren hinsichtlich der Erfüllung der Ziele wie auch der angestrebten Promotion unrealistisch. Die beantragten Mittel sind auch durch die beschriebene Ko-finanzierung angemessen.

Stärken des Vorhabens sind die für die erste Phase beschriebenen Ziele die mit der beschriebenen Vorgehensweise realistisch erreicht werden können.

Schwächen sehe ich in der Zeitplanung sowie in der zu vage formulierten ‚zweiten Phase‘. Auch wenn diese zweite Phase eine logische Konsequenz bei erfolgreicher Bearbeitung der ersten Phase darstellt, wäre ein Einzelantrag ohne diese zweite Phase zum jetzigen Zeitpunkt sicherlich noch besser zu bewerten.“

Gutachten 2:

„1. Qualität des Vorhabens

Das Verfahren der Bodenvereisung ist vor allem für Bau- und Abdichtungsmaßnahmen bei schwierigen Randbedingungen von praktischer Relevanz. In der Vergangenheit ist es bei Anwendungen des Verfahrens wiederholt zu unerwarteten Hebungen infolge Eislinnenbildung gekommen. Trotz einer Reihe von experimentellen Studien sind die physikalischen Mechanismen der Bildung und Evolution von Eislinnen und deren Beeinflussung durch verschiedene Prozessparameter noch nicht vollständig verstanden. Zur Verbesserung des Verständnisses und zur Quantifizierung der Prozesse sind im beantragten Forschungsvorhaben umfangreiche experimentelle Untersuchungen mit aufwändiger Instrumentierung geplant, welche anschließend auch als Basis einer numerischen Modellierung dienen sollen. Im Vergleich zu ähnlichen Studien, die im Rahmen abgeschlossener Forschungsprojekte durchgeführt wurden bzw. in der Literatur dokumentiert sind, ist der Einbezug einer größeren Bandbreite an Bodenarten, Temperaturrandbedingungen und Messgrößen geplant. Einige Messmethoden werden zum ersten Mal auf Gefrierversuche angewendet, was einen deutlichen Erkenntnisgewinn erwarten lässt. Ergebnisse aus begleitenden Versuchen zur Beziehung zwischen der Temperatur und dem ungefrorenen Wassergehalt sowie aus direkten und indirekten Versuchen zur Zugfestigkeit gefrorenen und ungefrorenen Bodens nahe des Gefrierpunktes stellen weitere essenzielle Grundlagen einer anspruchsvollen numeri-

schen Modellierung dar. Die Qualität der vorgeschlagenen experimentellen Forschung ist insgesamt als sehr hoch einzuschätzen. Die numerische Modellierung soll in einer zweiten Projektphase, mit einer zeitlichen Überlappung von 1,5 Jahren zur ersten Phase, in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Numerische Mathematik an der TUM erfolgen. Dieser interdisziplinäre Ansatz und die Kombination experimenteller und numerischer Forschung ist generell zu begrüßen. Auf Basis der sehr kurzen Beschreibung im Antrag kann die Qualität der geplanten numerischen Arbeiten allerdings nicht beurteilt werden.

2. Ziele und Arbeitsprogramm

Das Projekt verfolgt das Ziel, auf der Basis aufwändig instrumentierter Gefrierversuche an Bodenproben sowie begleitender Elementtests ein besseres Verständnis für die physikalischen Mechanismen der Eislinsenbildung und -evolution in unterschiedlichen Böden sowie die maßgebenden Einflussparameter zu gewinnen, die Prozesse zu quantifizieren und numerisch zu modellieren. Letzteres soll u.a. zuverlässigere Prognosen der zu erwartenden Hebungen bei Anwendung des Gefrierfahrens ermöglichen. Die Ziele des Projekts sind somit klar formuliert. Das Arbeitsprogramm und die gewählten Methoden sind prinzipiell geeignet, um diese Ziele zu erreichen.

Im Arbeitspaket 1 wird ein experimenteller Aufbau zur Untersuchung des Gefrierens und der Eislinsenbildung und -evolution in einer Bodensäule entwickelt. Während der grundlegende Aufbau des Experiments in ähnlicher Weise in einigen früheren Studien verwendet wurde, sollen darüber hinaus gehend Tensiometer und neuartige Piezometer zur Messung der durch das Frieren erzeugten Saugspannung, faseroptische Sensoren zur Messung des Temperaturfeldes entlang der gesamten Probenhöhe (nicht nur lokal) sowie digitale Kameras zur Ermittlung der vertikalen Dehnungen mittels DIC-Technik eingesetzt werden. Für die Aufnahme der Bilder der Probe zu unterschiedlichen Zeitpunkten wird der Rand der Probe aus Plexiglasringen gefertigt und die Isolierung zeitweise lokal entfernt. An den Rändern können die Temperaturen konstant oder als Rampe vorgegeben werden. Die faseroptischen Sensoren werden hier zum ersten Mal in Gefrierversuchen angewendet. Generell verspricht die umfangreiche und zum Teil innovative messtechnische Instrumentierung der Bodensäule gegenüber früheren Untersuchungen einen deutlichen Zuwachs an Informationen, insbesondere im Hinblick auf die Saugspannung im Bereich der Gefrierzone und das Temperaturfeld entlang der Probenhöhe. Der experimentelle Aufbau ist insgesamt gut durchdacht. Mögliche Schwächen wie lokale Störungen des Temperaturfeldes durch Sensoren oder die Entfernung der Isolierung für die Kameraaufnahmen werden klar adressiert und stellen keinen wesentlichen Nachteil dar. Positiv hervorzuheben sind die relativ großen Probenabmessungen (Höhe 400 mm, Durchmesser 200 mm), die repräsentative Ergebnisse erwarten lassen.

Das Arbeitspaket 2 sieht Versuche mit dem neu entwickelten Aufbau an Bodenproben mit geringer Neigung zur Eislinsenbildung vor. Die Testmaterialien Feinsand und sandiger Schluff sind hierfür geeignet. Für jedes Material sind Versuche mit zwei unterschiedlichen Auflastspannungen und sechs verschiedenen Temperaturrandbedingungen (konstante Temperaturen mit Variation der Randtemperaturen sowie Rampen mit unterschiedlichen Raten, letzteres allerdings erst in der zweiten Projektphase) geplant. Die vorgesehenen Variationen sind sinnvoll eingegrenzt. Begleitende Versuche u.a. zur Kompressibilität, Scherfestigkeit, Durchlässigkeit und thermischen Leitfähigkeit der ungefrorenen Böden runden das Versuchsprogramm ab.

Im Arbeitspaket 3 sind ähnliche Versuchsreihen an zwei Böden mit mittlerer bis starker Neigung zur Eislinsenbildung geplant. Hierfür werden ein sandiger und ein schluffiger Ton getestet. Im Vergleich zu den Versuchen in AP2 sind hier Effekte des osmotischen Druckes, der Destrukturierung und Rissbildung auf den Prozess der Eislinsenbildung zu erwarten. Eine Unterteilung des Versuchsprogramms in zwei Arbeitspakete macht somit Sinn, da sich die physikalischen Mechanismen zum Teil unterscheiden. An einzelnen Proben sind im Hinblick auf einen geplanten Schwerpunkt der zweiten Projektphase bereits Messungen der Setzungen während des Auftauens sowie der Wasserdurchlässigkeit nach dem Auftauen geplant. Dies wird die Definition eines zielgerichteten Versuchsprogramms für die zweite Projektphase erleichtern.

Das Arbeitspaket 4 enthält begleitende Versuche zum Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem Gehalt ungefrorenen Wassers im Boden (sog. soil freezing curve, SFC), welche eine wichtige Grundlage der numerischen Modellierung in der zweiten Projektphase darstellt. Diese Beziehung soll für unterschiedliche Gefriertemperaturen und -geschwindigkeiten mittels NMR-Spektroskopie am Fraunhofer-Institut ermittelt werden. Die experimentellen Arbeiten werden sinnvollerweise auf die beiden feinkörnigeren Böden begrenzt, da das Porenwasser der grobkörnigeren Materialien unterhalb des Gefrierpunkts in nahezu vollständig gefrorenem Zustand vorliegt. Alternativ wird eine näherungsweise Bestimmung der SFC über die Beziehung zwischen der Saugspannung und dem Sättigungsgrad teilgesättigter Böden (sog. soil water retention curve, SWR) verfolgt. Obwohl Vorarbeiten auf Ungenauigkeiten dieser Abschätzung hindeuten, wäre die Ermittlung über die deutlich einfacher experimentell zu bestimmende SWR von praktischem Vorteil.

Arbeitspaket 5 befasst sich mit der experimentellen Bestimmung der Spannungs-Dehnungsbeziehung und der Zugfestigkeit der gefrorenen Böden bei unterschiedlichen Gehalten gefrorenen Wassers nahe des Gefrierpunktes. Diese Versuche werden insbesondere für die Aufstellung von Kriterien für die durch Zugspannungen verursachte Rissbildung benötigt, welche wiederum einen wesentlichen Bestandteil der numerischen Modellierung darstellen. Für Bodenproben mit hohen Eisgehalten und damit hohen zu erwartenden Zugfestigkeiten soll eine indirekte Messung mittels eines neuartigen, am Institut des Antragstellers kürzlich entwickelten Hohlzylindergerätes erfolgen, während für geringere Eisgehalte und ungefrorenen Boden eine direkte Bestimmung in konventionellen einaxialen Zugversuchen geplant ist. Diese Versuchsreihe wird sinnvollerweise ebenfalls auf die beiden feinkörnigeren Bodenarten beschränkt, bei denen Rissbildungen relevant sind, sowie auf die Variation des Gehalts gefrorenen Wassers sowie der Temperatur.

Die aus den Arbeitspaketen 2 bis 5 gewonnenen experimentellen Ergebnisse bilden ergänzt durch Versuche aus der Literatur (u.a. aus früheren Arbeiten des Kooperationspartners an der University of Alberta) einen umfangreichen Datensatz für eine große Bandbreite an Böden, die sich hinsichtlich ihrer Sensitivität gegenüber einer Eislinsenbildung unterscheiden, mit vielfältigen Variationen der Randbedingungen, welcher eine sehr gute Basis für die Entwicklung und Validierung numerischer Modelle darstellt.

Der Zeitplan ist angesichts der geplanten größeren Anzahl aufwändiger und teilweise zeitintensiver Versuche ambitioniert, aber unter Einsatz der beantragten personellen Ressourcen realisierbar.

Die zweite Projektphase ist mit einer Überlappung von 1,5 Jahren zur ersten Phase geplant. In der dreijährigen zweiten Phase sollen die numerischen Arbeiten am Lehrstuhl für Numerische Mathematik erfolgen. Weitere experimentelle Arbeiten am Zentrum Geotechnik sollen angesichts der vollständigen Auslastung der Versuchsgeräte erst nach Abschluss der ersten Phase starten. Diese Zeitplanung ist nachvollziehbar, die enge Abstimmung zwischen Experimenten und Numerik zu begrüßen. Da die geplanten numerischen Arbeiten im Antrag nur angedeutet werden, können diese an dieser Stelle nicht beurteilt werden.

3. Qualifikation des Antragstellenden

Der Antragsteller hat sich in früheren Forschungsarbeiten umfassend mit der experimentellen Untersuchung gefrorener Böden und der Beschreibung des beobachteten Spannungs-Dehnungsverhaltens in Stoffmodellen befasst. Weiterhin kann er langjährige Erfahrungen mit der Anwendung der Bodenvereisung aus zahlreichen Praxisprojekten in das aktuelle Forschungsvorhaben einbringen. Der Antragsteller ist daher zweifelsohne sehr gut für die Leitung dieses Forschungsvorhabens qualifiziert.

4. Arbeitsmöglichkeiten und wissenschaftliches Umfeld

Die Arbeitsmöglichkeiten und das wissenschaftliche Umfeld am Institut des Antragstellers sind in Bezug auf die geplante Forschung zur Bodenvereisung als sehr gut einzuschätzen. Das Institut verfügt über eine funktionstüchtige und gut ausgestattete Kältekammer sowie zugehörige Versuchsaufbauten, die für das beantragte Projekt weiterentwickelt bzw. ergänzt werden sollen. Es bestehen langjährige Erfahrungen mit Versuchen an gefrorenen Böden. Der Austausch mit anderen zeitgleich am Institut verfolgten Forschungsvorhaben hinsichtlich der eingesetzten Methoden und Ergebnisse, beispielsweise zu teilgesättigten oder schaum-konditionierten Böden, wird zur erfolgreichen Bearbeitung des Forschungsvorhabens beitragen.

5. Empfehlung

Ich empfehle eine Förderung des beantragten Forschungsvorhaben ohne Kürzungen.

Angesichts der geplanten umfangreichen experimentellen Arbeiten ist die Beantragung von 36 Monaten Doktorand(in) (TVL-E13) und 10 Monaten Labortechniker (TVL-E7) angemessen. Das gleiche gilt für den Ansatz von 4 Monaten Feinmechaniker (TVL-E10) für die bauliche Realisierung des entwickelten Versuchsaufbaus im Arbeitspaket 1. Hierbei ist zu erwähnen, dass weitere Modifikationen an den Geräten vom vorhandenen Werkstattpersonal übernommen werden sollen und nicht als Projektkosten in Ansatz gebracht werden. Die für eine studentische Hilfskraft angesetzten Kosten über 3 Jahre (16.293 Euro) sind ebenfalls gut nachvollziehbar.

Für die Realisierung des Versuchsaufbaus in AP 1, insbesondere die Messtechnik und Geräte zur exakteren Vorgabe der Temperaturen am Probenrand, werden im Bereich der ‚Geräte bis 10.000 Euro‘ Kosten von insgesamt 34.546 Euro veranschlagt. Dabei werden die meisten Positionen nur zu 50% in Ansatz gebracht, während die Differenz vom Institut selbst getragen wird. Weitere 13.566 Euro werden für die extern am Fraunhofer-Institut durchgeführten Untersuchungen (NMR, SFC) beantragt. Einen größeren Posten im Bereich der ‚Geräte über 10.000 Euro‘ nimmt mit 44.932 Euro das faseroptische Messsystem ‚Luna ODiSI‘ ein, welches im Versuchsaufbau erstmals

für die kontinuierliche Messung der Temperatur über die gesamte Probenhöhe eingesetzt werden soll. Auch hierbei ist zu erwähnen, dass die beantragte Summe lediglich 35% des Anschaffungspreises ausmacht, während die restlichen 65% vom Institut selbst getragen werden. Die insgesamt beantragten Sachmittel sind mit ca. 93.000 Euro trotz größeren Eigenanteils sicherlich immer noch relativ hoch, den geplanten aufwändig instrumentierten Versuchen mit einem zu erwartenden deutlichen Erkenntnisgewinn jedoch angemessen.

6. Zusammenfassung der Stärken und Schwächen des Antrags

Stärken:

- Aufwändige, umfangreich instrumentierte Gefrierversuche an relativ großen Proben mit erstmaliger Anwendung innovativer Messverfahren (Faseroptik, DIC), die einen deutlichen Erkenntnisgewinn erwarten lassen
- Durchdachtes, sinnvoll eingegrenztes Versuchsprogramm an unterschiedlichen Böden mit umfangreicher Parametervariation
- Experimentelle Ergebnisse bilden sehr gute Basis für die anschließende Entwicklung numerischer Modelle
- Interdisziplinärer Ansatz mit Kombination experimenteller und numerischer Arbeiten in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Numerische Mathematik der TUM.

Schwächen:

Wenig Informationen zur geplanten numerischen Modellierung. Dies ist aber offenbar auf die mehrmalige Überarbeitung des Antrags als Folge früherer Begutachtungen zurückzuführen.“

Stellungnahme des Fachkollegiums:

"Es liegen zwei befürwortende Gutachten vor. Beide Gutachten bewerten den im Antrag beschriebenen Versuchsaufbau als wichtig, anspruchsvoll und als erkenntnisbringend für das Thema der Eislinnenbildung. Ebenso positiv wird übereinstimmend die Qualifikation des Antragstellers anerkannt. Die erstmalige Anwendung innovativer Messverfahren lasse einen deutlichen Erkenntnisgewinn erwarten. Das Versuchsprogramm sei durchdacht und sinnvoll eingegrenzt. Die experimentellen Ergebnisse bilden eine sehr gute Basis für die anschließende Entwicklung numerischer Modelle. Wenn in beiden Gutachten die Beschreibung der numerischen Modellierung nicht genau nachvollzogen werden kann, so liegt das an der Auslagerung dieser Arbeitspakete in ein Folgeprojekt infolge der Überarbeitung des Antrags und wird nicht als Hinderung angesehen.

Der Antrag wird zur Förderung vorgeschlagen."