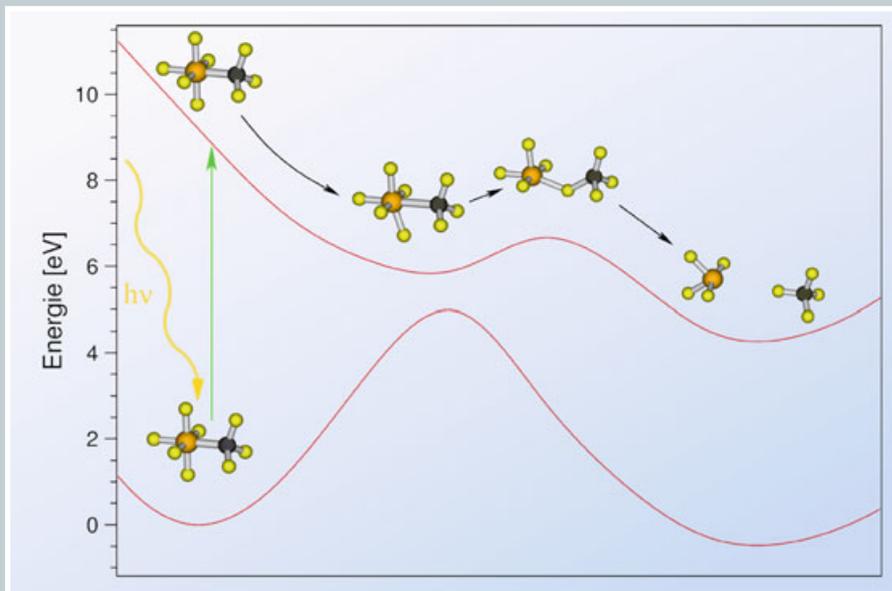


stand übergeht. Zur Erzeugung freier Elektronen ist jedoch eine Wellenlänge von  $\lambda \leq 122$  nm nötig. Da die kürzeren Wellenlängen bereits in größerer Höhe durch die

lohnt und bereits zu durchaus unerwarteten Erkenntnissen geführt: Gleich nach der elektronischen Anregung beginnt sich das Molekül zu verformen, wobei sich die zentrale S-C-Bindung stark dehnt und sich ein F-Atom des SF<sub>5</sub>-Fragments in Richtung CF<sub>3</sub> verbiegt. Eine weitere S-F-Bindung wird ebenfalls stark gestreckt. Die Energie des absorbierten



Durch Photoanregung ( $h\nu$ ) geht das SF<sub>5</sub>CF<sub>3</sub>-Molekül in den angeregten Zustand über (grüner Pfeil) und zerfällt dann unter Übertragung eines Fluoratoms. Die roten Kurven geben die berechneten Energien der beiden elektronischen Zustände an. Orange: Schwefel, gelb: Fluor, schwarz: Kohlenstoff.

Atmosphäre herausgefiltert werden, nimmt ihre Strahlungsintensität mit abnehmender Höhe rapide ab. Dadurch kann SF<sub>5</sub>CF<sub>3</sub> auf seiner vertikalen Wanderung durch die Atmosphäre zuerst Photonen von  $\lambda \sim 133$  nm absorbieren, bevor es in Höhen gerät, in denen genügend freie Elektronen vorhanden sind.

Die nächste Frage zu lösen - wie verhält sich SF<sub>5</sub>CF<sub>3</sub> nach der elektronischen Anregung? -, ist eine knifflige Aufgabe, da die theoretische Behandlung von Molekülen in angeregten Zuständen sehr schwierig ist und die Größe des Moleküls (also die Anzahl der Elektronen) an der Grenze des derzeit Machbaren liegt. Die Mühe hat sich allerdings ge-

neneinfach verkürzen diese beiden Zerfallsmechanismen die Lebensdauern von SF<sub>5</sub>CF<sub>3</sub> etwas, weil die notwendige Strahlung bereits in tieferen Regionen der Atmosphäre zur Verfügung steht. Die Wissenschaftler haben jedoch noch einen weiteren Reaktionsweg gefunden, der einen völlig neuen Aspekt ins Spiel bringt: Während des Bruchs der S-C-Bindung kann ein F-Atom vom SF<sub>5</sub>- auf das CF<sub>3</sub>-Fragment übertragen werden, wobei CF<sub>4</sub> und SF<sub>4</sub> (im angeregten Zustand) entstehen. CF<sub>4</sub> ist ebenfalls ein bekanntes Treibhausgas, zwar weniger effizient als SF<sub>5</sub>CF<sub>3</sub>, dafür aber quasi unzerstörbar mit einer geschätzten Lebensdauer von 50 000 Jahren. Dieses überraschende Ergebnis deutet an, dass zumindest ein kleiner Teil der Treibhausaktivität von SF<sub>5</sub>CF<sub>3</sub> in Form von CF<sub>4</sub> erhalten bleibt. Wie groß dieser Anteil tatsächlich ist, sollen weitere theoretische Untersuchungen zeigen, die hoffentlich in Zukunft auch eine experimentelle Bestätigung anregen werden.

**Dr. Wolfgang Eisfeld**  
**Lehrstuhl für Theoretische Chemie**  
**Tel.: 089/289-13614**  
**wolfgang.eisfeld@ch.tum.de**

Photons reicht aus, um das Molekül in ein SF<sub>5</sub>- und ein CF<sub>3</sub>-Fragment zu spalten. Dennoch ist dies nicht der günstigste Zerfallsweg, da ausgehend vom angeregten Zustand ein Ionenpaar erzeugt wird. Ein deutlich effizienterer Prozess ist die gleichzeitige Spaltung der S-C- und einer S-F-Bindung, die zu SF<sub>4</sub>, CF<sub>3</sub> und einem F-Atom führt.

Verglichen mit dem dissoziativen Elektro-

*Wolfgang Eisfeld*

Geotechnik-Labor unter dem Rathaus

## Eis als Baustoff

**Unter dem Münchner Rathaus tut sich was: An der U-Bahn wird gebaut, und im Zusammenhang damit beobachten Wissenschaftler vom Lehrstuhl und Prüfamf für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik (Zentrum Geotechnik) der TUM (Prof. Norbert Vogt) in rund 15 Metern Tiefe das Verformungsverhalten von gefrorenem Boden. Üblicherweise verbindet man mit dem Begriff »Labor« weiße Kittel, filigrane Messtechnik und steriles, zumindest staubfreies Arbeiten. Von dieser Vorstellung muss man sich lösen, wenn - wie im vorliegenden Fall - das Labor eine robuste Tunnelbaustelle ist. Aber: Der geometrische Maßstab der Messtechnik hat keinen Einfluss auf die Qualität der Untersuchungsergebnisse.**

Der U-Bahnhof Marienplatz wird derzeit unter dem Neuen Rathaus auf Höhe der U6 erweitert - man braucht mehr Kapazität, um die Fahrgäste zum neuen Fußballstadion zu bringen. Es entstehen zwei Begleittunnel, die parallel zu den bestehenden U-Bahnrohren verlaufen und unter den Gebäudeflügeln des historischen Rathauses liegen. Zum Bau dieser Tunnel wird der Boden vereist, um ihm mehr Festigkeit zu verleihen. Die dafür notwendigen Vereisungsanlagen wurden von Pilotstollen aus gebohrt, die vorab seitlich versetzt über den Begleittunneln hergestellt wurden.

Das Verfahren der Bodenvereisung zur künstlichen Stabilisierung von Böden in Lockergesteinen hat Hermann Poetsch bereits 1883 in Deutschland zum Patent angemeldet. Die Vereisung lässt das im Boden enthaltene Porenwasser gefrieren, was dem Boden in etwa die Festigkeit von Magerbeton verleiht und ihn wasserdicht macht. Um die Standsicherheit der vereisten Bodenkörper ermitteln zu können, muss man die Festigkeitseigenschaften des gefrorenen Bodens untersuchen. Wendet man die Bodenvereisung unter setzungsempfindlichen Bauwerken an, muss das Maß von Frosthebungen begrenzt werden, um Schäden zu vermeiden. Frosthebungen infolge von Bodenvereisungsmaßnahmen zu prognostizieren, ist zentrales Ziel eines aktuellen Forschungsvorhabens am Zentrum Geotechnik.

Nach dem derzeitigen Kenntnisstand lassen sich Frosthebungen im Wesentlichen auf zwei Mechanismen zurückführen: Zunächst kommt es - soweit nicht widerstandsfrei erreichbare freie Porenräume (Kies) vorhanden sind - durch die etwa neunprozentige Volumenzunahme beim Übergang von Wasser zu Eis zu homogenen Frosthebungen, deren Maß proportional zur Dicke der gefrorenen Schicht ist. Weiterhin bilden sich insbesondere bei feinkörnigen Böden an der Grenze vom gefrorenen zum ungefrorenen Boden aus reinen Eiskristallen wachsende Körper, »Eislinsen«, die auch bei gleich bleibender Temperatur allmählich Hebungen herbeiführen.

Um die verschiedenen Hebungsanteile getrennt er-

fassen zu können, wurde ein Laborversuch entwickelt, bei dem wesentliche Randbedingungen simuliert werden - etwa das Vorhandensein von drainierten Verhältnissen oder die vor Ort auf den Vereisungskörper wirkende Auflast. In einer Zwei-Kammer-Technik wird eine Bodenprobe eindimensional von oben gefroren, kann jedoch gleichzeitig über die Unterseite Wasser aufnehmen. Die im Labor ermittelten Hebungsbeträge und -geschwindigkeiten dienen als Eingangsgröße in Finite-Element-Berechnungen, mit denen die Auswirkungen der Frosthebungen bis zur Geländeoberfläche simuliert werden.



Blick in den Pilotstollen mit den Vereisungslanzen.

Foto: Christian Kellner

Das tatsächliche Verformungsverhalten wird vor Ort zum einen direkt mit einem im zweiten Kellergeschoss des Rathauses installierten Schlauchwaagen-Messsystem, zum anderen indirekt durch Messungen mit Dehnmessstreifen an den Bewehrungsstählen der Tunnelschale erfasst. Eine Schlauchwaage misst nach dem Prinzip der kommunizierenden Röhren Setzungsdifferenzen bis zu 1/100 mm an ausgewählten Messpunkten. Dehnmessstreifen sind dünne Folien mit einem aufgeprägten Messgitter, deren elektrischer Widerstand sich mit der Längenänderung des Messgitters ändert. Der Widerstand der Folie ist somit ein Maß für Verformungen des Bauteils, an dem die Folie angebracht ist.

Diese Messungen bestätigten die über Laborversuche und zugehörige Finite-Element-Berechnungen in einer Größenordnung von rund fünf Millimetern prognostizierten Frosthebungen - was jedoch nicht zu dem Schluss führen darf, alle Mechanismen der Frosthebung seien geklärt und ausreichend beschrieben. Es besteht weiterer Forschungsbedarf, um den gekoppelten Wärme- und Massentransport im Boden zu klären.

Die wissenschaftliche Begleitung des Bauvorhabens ist eine einmalige Gelegenheit, eine Modellvorstellung in einem ansonsten nicht finanzierbaren Großversuch zu validieren. Dank gebührt dem U-Bahn-Referat der Stadt München und der ausführenden Firma Bögl für die stets unkomplizierte Zusammenarbeit.

Christian Kellner

**Dipl.-Ing Christian Kellner**  
**Zentrum Geotechnik**  
**Tel.: 089/289-27141**  
**c.kellner@bv.tum.de**