

Optimale Auslegung ergibt besseren Nutzen

Im Labor für Bodenmechanik an der EPFL in Lausanne erarbeitet ein Forschungsteam konstruktive Empfehlungen zur optimalen und zuverlässigen Auslegung von Energiepfählen. Dazu gehört auch die Entwicklung eines neuen Berechnungsprogramms.

Für Gebäude wird in der Schweiz beinahe die Hälfte des gesamten Energieverbrauchs eingesetzt. Heizung und Kühlung gehören zu den wichtigsten Verursachern der CO₂-Emissionen. Die Herausforderung besteht deshalb, die Umweltauswirkungen des Gebäudeparks zu verringern und gleichzeitig den Einsatz erneuerbarer Energien zu verstärken. Das Labor für Bodenmechanik an der EPFL in Lausanne erforscht und entwickelt deshalb Methoden zur Nutzung von Erdwärme mit den vorhandenen Geostrukturen im Boden.

Pfähle dienen der Unterstützung

Pfähle sind Teil dieser Geostrukturen und werden im Allgemeinen als Gebäude- und Brückenfundamente eingesetzt, um umfangreiche Senkungen der oberen Strukturen zu vermeiden, sowie bei Baukonstruktionen im Meer. Sie nehmen die hohen Lasten der Baukörper auf und überwinden schlechten Baugrund. Bei der Planung von Geostrukturen sollten folgende Aspekte berücksichtigt werden:

- Erd- und Grundwassersituation
- Installationsmethode
- Verhalten und Sicherheit des Gebäudes
- Auswirkungen auf die Umwelt usw.

Es besteht ein Optimum zwischen der Pfahlkonzeption, den Pfahlabständen und der Gestaltung der tragenden Struktur des Gebäudes.

Zum Einsatz kommen Pfähle ohne Aushub des Untergrunds (z.B. Ramppfähle). Hierzu werden vorfabrizierte Pfähle verwendet. Bei sandigem Untergrund wird dieser beim Einbringen des Pfahles komprimiert. Bei der anderen Pfahlversion wird die Erdmasse zunächst ausgehoben oder ausgebohrt. Danach giesst man Beton in das entstandene Loch und stellt so den Pfahl her (z.B. Ortbetonpfähle). Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal betrifft die Lage eines Pfahls. Der eine stützt sich auf felsigem Untergrund auf, während die andere Version im Untergrund «fixiert» ist und nur durch den seitlichen Widerstand hält.

Vielzahl an Geostrukturen ist im Einsatz

Geostrukturen haben die Aufgabe, als Fundamente zu dienen und die Stabilität von Konstruktionen, Infrastrukturen und Abstützungen zu gewährleisten. Auch diese Elemente können als Wärmetauscher und Energiespeicher ge-

nutzt werden. Sowohl bei Energiepfählen als auch anderen Formen von Geostrukturen werden Absorberrohre eingebaut, mit welchen ein Primärkreislauf realisiert und der Energiegewinn zur Wärmung und Kühlung von Gebäuden und Infrastrukturen eingesetzt werden kann. Im Allgemeinen nutzt man die saisonale Speicherkapazität des Untergrunds aus und schaltet nach dem winterlichen Wärmeentzug im Sommer auf das Free-cooling-System, bei welchem der Untergrund wieder thermisch aufgeladen wird.

Vorgefertigte Pfähle für das direkte Einbringen in den Untergrund sind in der Regel dünner, weisen nur ein einziges U-Rohr auf. Aufgrund der Beschädigungsgefahr dieser Rohre nehmen die

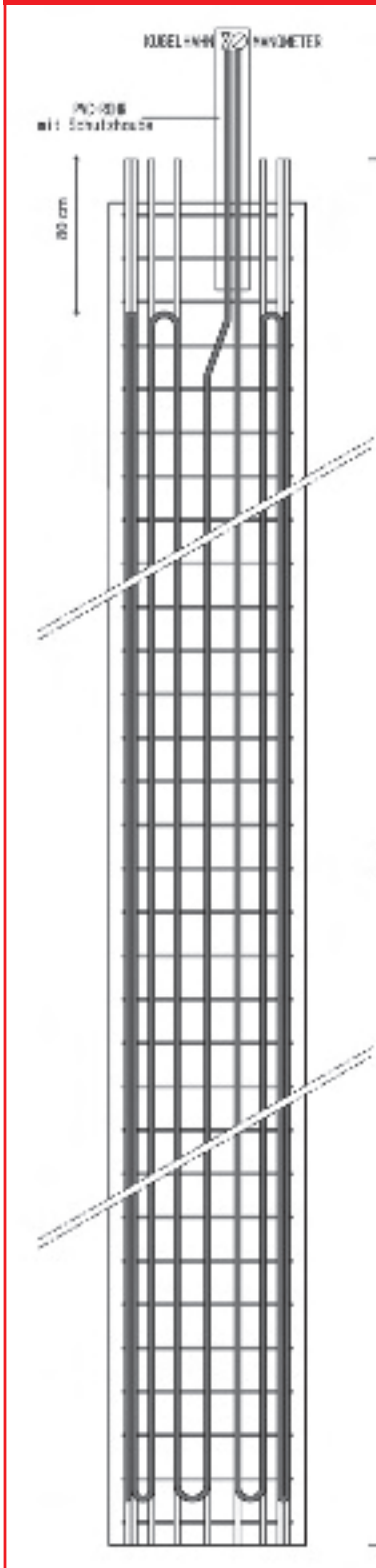
> Prof. Dr. Lyesse Laloui
> Alice Di Donna
EPFL – ENAC – LMS
CH-1015 Lausanne
lms@epfl.ch
<http://lms.epfl.ch>



>> Geostrukturen bieten in Agglomerationen interessante Wärme- und Kältepotenziale.

>> *Les géostructures offrent des potentiels de chaleur intéressants dans les agglomérations.*

Heizen und Kühlen mit Erdwärme und Erdkühle



Pfahlfundierungen, Schlitzwände und Fundamentplatten lassen sich mit dem von **ENERCRET** entwickelten System zum **Heizen u. Kühlen** von Gebäuden einsetzen.

Das **ENERCRET** - System findet vom Einfamiliengebäude bis zum Bürokomplex Verwendung.

ENERCRET bietet:

- Beratung
- Planung
- Simulation
- Installation

ENERCRET

- 25 Jahre Erfahrung
- 500 Projekte im In- und Ausland

ENERCRET GmbH
Bundesstraße 20
A - 6832 Röthis

www.enercret.com

enercret®

gebohrten und vor Ort gegossenen Pfähle mit grossem Durchmesser und somit mehreren Absorberrohren an Bedeutung zu.

Leistungsannahmen:

- Energiepfähle Durchmesser 0.3 – 0.5 m:
40 – 60 W/m
- Energiepfähle Durchmesser > 0.6 m:
35 W/m² Erdkontaktfläche
- Schlitzwände (Diaphragm Walls):
30 W/m².

Thermische Beanspruchungen sind wesentlich

Lyesse Laloui, Direktor des Labors, sagt: «Es sind in der Praxis Berechnungswerkzeuge vorhanden, mit denen die Auslegung der Pfähle und ihrer Abstände entsprechend den vorhandenen Gewichten, der Beschaffenheit des Untergrunds und den notwendigen Materialien durchgeführt werden kann. Wir wollen aber weiter gehen. Ziel unserer Studien sind Empfehlungen für die Auslegung von energetisch genutzten Pfählen, also Energiepfählen, welche einerseits die bauphysikalischen und geologischen Bedingungen erfüllen müssen, andererseits aber mit thermischen Belastungen konfrontiert werden. Es gilt nämlich zu beachten, dass Betonpfahl und Untergrund von den hohen Temperaturschwankungen gegenseitig beeinflusst bzw. verändert werden.»

Seit den frühen 1980er-Jahren werden Fundamentelemente geothermisch genutzt, vor allem in Deutschland, Österreich, England und der Schweiz, aber auch zunehmend in Japan, Kanada, Italien, Holland usw. In der Schweiz gehören der Terminal E des Flughafens Zürich, die Primarschule in Fully sowie das Pago-Gebäude in Grabs zu den frühen Leuchtturmprojekten. In Österreich werden erfolgreich Tunnelanlagen energetisch genutzt (Lainzer-Tunnel, U2/2 Metrostation in Wien usw.).

Die SIA-Dokumentation 190 nennt einige Anforderungen an Geostrukturen: Innentemperaturen müssen positiv sein, die Oberfläche zwischen Pfahl und Erde darf nicht einfrieren usw. Das thermomechanische Verhalten des Erdreichs war aber stets eine fundamentale Herausforderung für Geotechnik-Ingenieure. Das Verständnis dieser Zusammenhänge bildet jedoch einen wesentlichen Aspekt der Gestaltung von Geostrukturen.

Erforschung des Bodenverhaltens

Alice Di Donna, Doktorandin am LMS, meint: »Während einige Erkenntnisse zum Verhalten von Lehm bei Temperaturen zwischen 18 und 100 °C vorhanden sind, fehlen fundierte Resultate für den tieferen Temperaturbereich. Zum einen geht es um Deformationseffekte durch Temperaturschwankungen bei konstanter Belastung, zum andern um den Einfluss von Temperaturen auf die Kompressions- und Verformungsfähigkeit

sowie den Scherwiderstand des Untergrunds. Experimente an der EPFL testeten das thermo-mechanische Verhalten bei tiefen Temperaturen.»

In Lausanne werden Tests mit Heiz- und Kühlzyklen durchgeführt. Dazu nutzte man beispielsweise einen 1998 erstellten Pfahl, der mit einem Wärmetauscher ausgestattet ist. Zunächst wurde er ohne Gewicht thermisch beansprucht, danach jeweils mit der Erstellung der einzelnen Gebäudetagen. Es konnte festgestellt werden, dass die thermische Beanspruchung auf der gesamten Pfahllänge signifikant ist. Der Pfahl steht also in einer Wechselwirkung mit dem Untergrund; Berechnungen für einen Pfahl einzig auf rein mechanische Lasten auszulegen entspricht somit nicht den tatsächlich auftretenden Effekten. Diese Erkenntnisse konnten auch von Untersuchungen in England (Lambeth-College) und Österreich (Bad Schallerbach) gewonnen werden.

Neuartiges Berechnungsmodell im Einsatz

Ein unter Last stehender Pfahl verhält sich bei Erwärmung und Abkühlung durch den energetischen Austausch sehr komplex. Seine natürlichen Deformationsbewegungen sind – eingebettet im Untergrund – limitiert, jedoch von der Bodenbeschaffenheit abhängig.

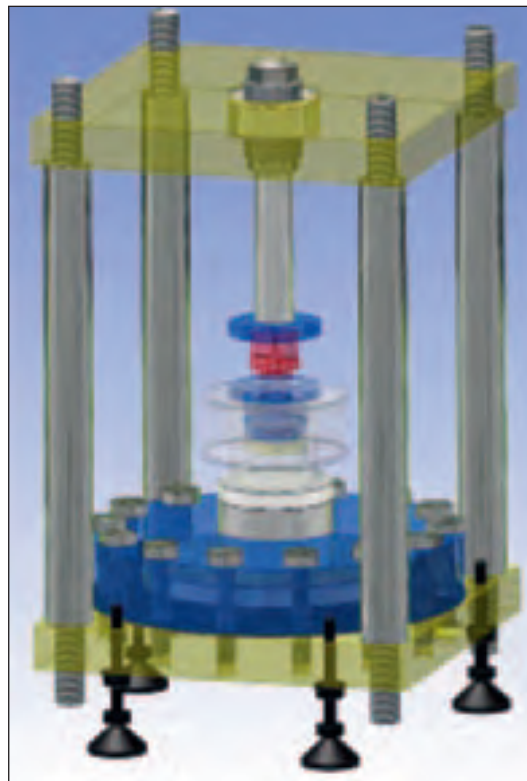
«Wir haben an der EPFL in den vergangenen Jahren an Finite-Elemente-Modellen zur Simulation des Energiepfahlverhaltens gearbeitet. Dieses thermo-hydro-mechanische Modell berücksichtigt den Wärmefluss nach dem Fourier-Gesetz und den Porenfluss nach Darcy-Regel», bestätigt Lyesse Laloui.

Eine im 2009 durchgeführte Weiterentwicklung berücksichtigte eine Gruppe von neun Pfählen jenseits konventioneller Temperaturbereiche. Zurzeit wird am LMS ein nutzerfreundliches Werkzeug entwickelt: ThermoPile. Es beruht auf einer Aufteilung des Pfahls in einzelne Segmente und erlaubt damit, unterschiedliche Erdschichten zu berücksichtigen, also ihr jeweiliges elastisch-plastisches Verhalten einzubeziehen.

Komplexe Zusammenhänge erforschen

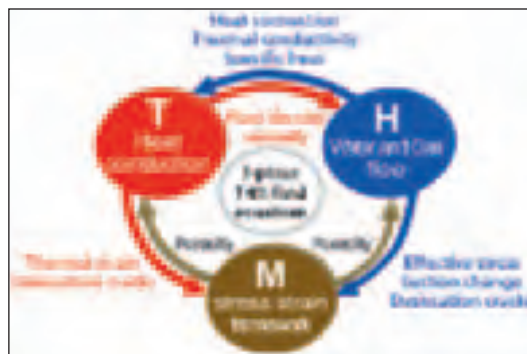
Bei der Dimensionierung von Energiepfählen und anderen Geostrukturen wurden die Berechnungen üblicherweise nur mit einem empirischen Ansatz zum Wärmeaustausch durchgeführt, ohne die mechanischen Effekte der Temperaturschwankungen zu berücksichtigen. Damit konnte die Dimensionierung jedoch ausschliesslich mit einfachen Wärmeflusswerten erfolgen. Eine optimale Dimensionierung sollte allerdings die thermo-mechanischen Effekte miteinbeziehen.

Eine Weiterentwicklung der Berechnungswerkzeuge muss die komplexen Zusammenhänge von mechanischen Parametern des Fundamentalsystems, der Temperaturen und Grundwasser-



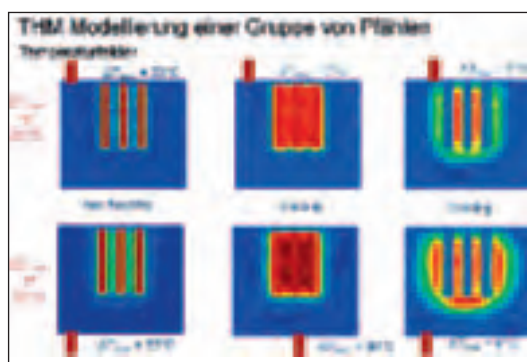
>> Bodenverhalten unter variierender Temperatur; Analyse der Bodenproben bei Temperaturveränderungen (0 – 60 °C).

>> *Comportement du sol par températures variables; analyses des échantillons de sol lors de changements de températures (0 – 60 °C).*



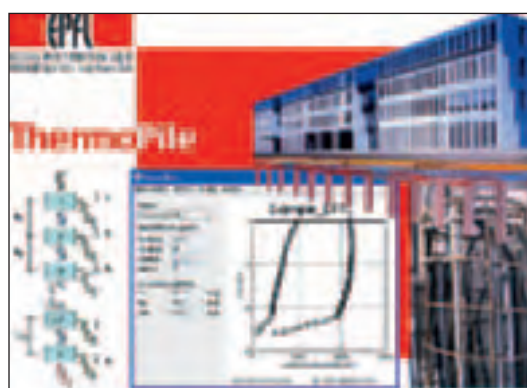
>> Modellierung eines Boden-Pfahl-Systems.

>> *Modélisation d'un système de pieux de sol.*



>> Modellierung einer Gruppe von Pfählen.

>> *Modélisation d'un groupe de pieux.*



>> ThermoPile separiert einzelne Pfahlsegmente und berücksichtigt damit unterschiedliche Bodenverhältnisse.

>> *Le ThermoPile sépare des segments isolés de pieux et prend en compte les différentes conditions du sol.*

>> Bilder: LMS / EPFL

Beispiele

Pago-Gebäude in Grabs:	570 Energiepfähle
Terminal E, Flughafen Zürich:	ca. 300 Energiepfähle, 90 und 150 cm Durchmesser, 30 m Länge, Erdvolumen ca. 200'000 m ³
Main Tower in Frankfurt (D):	112 Energiepfähle, 150 cm Durchmesser, 30 m Länge, Erdvolumen ca. 150'000 m ³
Kunstmuseum Bregenz (A):	Schlitzwände
Lainzer-Tunnel (A):	Seitenwände mit Absorberrohren
Keble College (UK):	Gemischte Pfahlwand.

vorkommen sowie die nichtlinearen Gesetzmässigkeiten des Erdspeichers berücksichtigen. Auf diese Weise können die Kosten der Anlage reduziert und die Energieeffizienz erhöht werden.

Das Forschungsprojekt der EPFL befasst sich im Weiteren mit der thermo-mechanischen Bestimmung von Erdproben im Labor, inkl. triaxialen und ödometrischen Tests im Temperaturbereich von 0 – 60 °C. Dabei werden die Effekte der Temperatur auf die Deformier- und Komprimierbarkeit, Plastizität, Scherwiderstand usw. von lehmiger und sandiger Erde analysiert. Zudem sollen Scherversuche zwischen Beton und Erde mit Zyklentests im gesamten Temperaturbereich Aufschluss über das Aufwärm- und Abkühlver-

halten geben. Mit einem Pfahltest im Labor werden die errechneten und gemessenen Resultate überprüft.

«Ziel dieses Projekts sind konstruktive Empfehlungen zur optimalen und zuverlässigen Auslegung von Energiepfählen», sagt Alice Di Donna. <

Résumé

Une équipe de recherche du laboratoire de mécanique des sols à l'EPFL élabore des recommandations sur la pose optimale et sûre des pieux énergétiques. Ses travaux intègrent aussi le développement d'un nouveau programme de calcul. Le dimensionnement des pieux énergétiques et d'autres géostructures n'étaient habituellement calculés qu'au moyen d'une équation empirique d'échange de chaleur sans tenir compte des effets mécaniques dus aux changements de température. Le résultat se basait donc sur de simples valeurs de flux de chaleur. Un dimensionnement optimal devrait assurément inclure les effets thermo-mécaniques.

INSERATE

gruneko >
a Gruner company

Generalplanung vom Konzept bis zur Inbetriebnahme.

- > **Geothermie für die erdwärme riehen**
- > **Geospeicher Novartis Campus, Basel**
- > **Erdwärmesonden CityGate, Basel**

Gruneko Schweiz AG
Ingenieure für Energiewirtschaft
St. Jakobs-Strasse 199, CH-4020 Basel
Telefon +41 61 367 95 95, Fax +41 61 367 95 85
www.gruneko.ch

 **HakaGerodur**



Gut ist uns nicht gut genug! Die neue GEROtherm® Erdwärmesonde

Die 100'000fach bewährte GEROtherm®-Erdwärmesonde wurde von Grund auf überarbeitet. Überzeugende Vorteile machen sie zur ersten Wahl für Planer, Baumeister und Bauherren. Ein minimaler Druckverlust, eine verstärkte Wandung mit schlankem, innovativen Schutzdesign und eine lange Lebensdauer sind nur einige der zahlreichen überzeugenden Vorteile. Das GEROtherm®-Gesamtsystem ist gemäss der SKZ Systemrichtlinie HR 3.26 zugelassen und erfüllt alle Anforderungen von VDI 4640 und SIA 384/6.

HakaGerodur AG
Giessenstrasse 3
CH-8717 Benken

Tel. +41 (0)55 293 25 25
Fax +41 (0)55 293 25 26
sekretariat@hakagerodur.ch
www.hakagerodur.ch