



Delft University of Technology

Document Version

Final published version

Licence

Dutch Copyright Act (Article 25fa)

Citation (APA)

Tafili, M., Rafai, M., Salimi, M. J., Ashrafi, M., Vardon, P., & Wichtmann, T. (2026). Bedeutung thermoplastischer Stoffmodelle für die Bemessung von Energiepfählen. *Bautechnik*. <https://doi.org/10.1002/bate.70101>

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

In case the licence states "Dutch Copyright Act (Article 25fa)", this publication was made available Green Open Access via the TU Delft Institutional Repository pursuant to Dutch Copyright Act (Article 25fa, the Taverne amendment). This provision does not affect copyright ownership.
Unless copyright is transferred by contract or statute, it remains with the copyright holder.

Sharing and reuse

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

This work is downloaded from Delft University of Technology.

Bedeutung thermoplastischer Stoffmodelle für die Bemessung von Energiepfählen

Energiepfähle werden zunehmend als multifunktionale Gründungselemente eingesetzt, die tragende Funktionen mit der Nutzung geothermischer Energie kombinieren. Während das mechanische Verhalten in der Bemessung üblicherweise berücksichtigt wird, werden thermische Einwirkungen häufig in vereinfachter elastischer Form behandelt. Langzeitiges Heizen und Kühlen kann jedoch irreversible Bodenverformungen und Spannungumlagerungen hervorrufen, insbesondere in weichen und geschichteten Böden. Dieser Beitrag untersucht die Relevanz thermoplastischen Bodenverhaltens für die Bemessung von Energiepfählen unter Verwendung eines thermo-visko-hypoplastischen Stoffmodells für feinkörnige Böden (AVISA-T), das zyklische Belastung berücksichtigt. Das Modell wird in einem Finite-Elemente-Programm implementiert und anhand großmaßstäblicher Energiepfahlversuche in Delft (NL) unter unterschiedlichen axialen Lastniveaus und langzeitiger thermischer Beanspruchung evaluiert. Die Ergebnisse zeigen, dass thermoplastische Effekte maßgeblich die Pfahlkopfverformungen sowie die Umlagerung der Normalkräfte entlang des Pfahls bestimmen können, was mit konventionellen thermo-elastischen oder thermo-elasto-plastischen Ansätzen nicht erfasst wird.

Stichworte Energiepfähle; thermomechanische Belastung; zyklische Belastung; Heizen; Kühlen; thermoplastisches Materialmodell; Kriechen; Ratenabhängigkeit; feinkörnige Böden

Thermoplastic soil models in the design of energy piles

Energy piles are increasingly used as multifunctional foundation elements that combine structural load-bearing capacity with geothermal heat exchange. While mechanical behaviour is commonly addressed in design, thermal effects are often treated in a simplified elastic manner. However, long-term heating and cooling may induce irreversible soil deformations and stress redistributions, particularly in soft and layered soils. This contribution investigates the relevance of thermoplastic soil behaviour for the design of energy piles using a thermo-visco-hypoplastic constitutive model for fine-grained soils (AVISA-T) that accounts for small-strain effects. The model is implemented within a finite-element framework and evaluated against field-scale energy pile tests conducted in Delft, NL, under different axial load levels and long-term thermal loading. The results demonstrate that thermoplastic effects may govern pile head displacements, shaft force redistribution, and the development of dragdown, which cannot be captured by conventional thermo-elastic or thermo-elasto-plastic approaches.

Keywords energy piles; thermo-mechanical loading; cyclic loading; heating; cooling; thermo-plastic constitutive model; creep; rate-dependency; fine-grained soils

1 Einführung

Die numerische Modellierung des thermo-mechanischen Verhaltens feinkörniger Böden ist von zentraler Bedeutung für die sichere Bemessung und die Bewertung des Langzeitverhaltens (energiebezogener) geotechnischer Systeme. Dazu zählen unter anderem geothermische Gründungen und Geoenergiestrukturen, erdverlegte Stromkabel, Öl- und Gasleitungen sowie Endlager für radioaktive Abfälle [1–6]. Feinkörnige Böden reagieren besonders sensibel auf Temperaturänderungen, was auf ihre mineralogische Zusammensetzung, ihre Mikrostruktur und ihre Spannungs- und Belastungsgeschichte zurückzuführen ist. Unterschiede in der Tonmineralogie und der Tonaktivität beeinflussen maßgeblich die Kräfte zwischen den Bodenpartikeln, die Gefügeentwicklung sowie das Verhalten der diffusen Doppelschicht. In der Folge treten temperaturabhängige Änderungen der Steifigkeit, Festigkeit, Fließspannung und des volumetrischen Verformungsverhaltens auf [7–11].

Experimentelle Untersuchungen zeigen, dass das thermisch induzierte Volumenänderungsverhalten stark von der Spannungsgeschichte des Bodens abhängt. Normal konsolidierte feinkörnige Böden weisen bei Erwärmung in der Regel irreversible Kontraktionen auf, während überkonsolidierte Böden eher zu teilweise reversibler thermisch induzierter Volumenexpansion neigen [12, 13]. Bei wiederholten Heiz- und Kühlzyklen treten irreversible thermische Dehnungen insbesondere in den ersten Zyklen normal konsolidierter Böden auf und nehmen mit zunehmender Zyklenzahl ab. Dieses Verhalten wird als thermisches Shakedown-Phänomen bezeichnet [14, 15].

Die thermo-mechanische Kopplung wird komplexer, wenn thermische Beanspruchungen mit mechanischer monotoner oder zyklischer Belastung überlagert werden. Temperaturänderungen können die Dehnungsakkumulation während nachfolgender mechanischer Zyklen verstärken, insbesondere bei leicht überkonsolidierten oder normalkonsolidierten Böden [16]. Eine realistische

Abbildung dieser gekoppelten Mechanismen erfordert Stoffmodelle, die irreversible, pfadabhängige und zeitabhängige Bodenreaktionen erfassen können.

In den letzten Jahren hat sich die Hypoplastizität als vielversprechender Ansatz zur Modellierung des nicht-linearen, zustands- und pfadabhängigen Verhaltens feinkörniger Böden etabliert, ohne auf explizite Fließflächen oder plastische Potenziale zurückzugreifen [17]. Thermisch erweiterte hypoplastische Formulierungen wurden vorgeschlagen, um thermisches Shakedown und zyklische Effekte zu beschreiben [18–21]. Das anisotrope viskose Intergranular-Strain-Anisotropy-Modell (AVISA) [22] integriert darüber hinaus Anisotropie, Zeitabhängigkeit und Ratenabhängigkeit in einem modularen hypoplastischen Rahmen und wurde umfangreich anhand von Elementversuchen sowie Randwertproblemen validiert [23–27].

Aufbauend auf diesen Entwicklungen wird im vorliegenden Beitrag die Erweiterung des AVISA-Modells auf thermo-mechanische Beanspruchungen zusammengefasst, woraus die Stoffmodellformulierung AVISA-T hervorgeht [28]. Das Modell ermöglicht eine einheitliche Beschreibung des thermo-mechanischen Bodenverhaltens durch die Kopplung thermischer Effekte mit mechanischer monotoner und zyklischer Belastung unter konsistenter Berücksichtigung von Anisotropie, Zeitabhängigkeit und Kleinverzerrungssteifigkeit.

Die Anwendbarkeit von AVISA-T wurde bereits in [29, 30] anhand numerischer Untersuchungen eines in Delft (Niederlande) errichteten, im Boden verdrängend hergestellten Ortbeton-Energiepfahls in geschichtetem Weichboden unter langzeitiger, monotoner Kühlung und variierenden mechanischen Lastniveaus gezeigt. Energiepfähle stellen eine Schlüsseltechnologie für nachhaltiges Bauen dar, da sie die Tragfunktion von Gründungen mit der Nutzung oberflächennaher Geothermie kombinieren. Feldversuche zeigen, dass thermische Beanspruchungen insbesondere in weichen Böden zu Spannungsumlagerungen, Pfahlkopfhebungen oder -setzungen sowie zu zusätzlichen Dragdown-Effekten führen können [31, 32].

Die vorliegende Arbeit konsolidiert die in [29, 30] vorgestellten Ergebnisse, indem das zeitabhängige thermo-hypoplastische Stoffmodell AVISA-T im Finite-Elemente-Programm PLAXIS zur Analyse des gekoppelten thermo-mechanischen Verhaltens eines Energiepfahls unter zyklischer Belastung in weichen Böden eingesetzt wird. Die numerischen Simulationen werden anhand großmaßstäblicher In-situ-Messungen validiert und liefern weiterführende Erkenntnisse zum Einfluss des mechanischen Lastniveaus auf thermisch induzierte Spannungen, Dehnungen und langfristige Verschiebungen.

2 Thermo-visko-hypoplastisches Stoffmodell (AVISA-T)

Die Analyse von Energiepfählen unter langzeitiger thermischer Beanspruchung erfordert Stoffmodelle, die über eine rein thermo-elastische Beschreibung hinausgehen. Temperaturänderungen können insbesondere in weichen und geschichteten feinkörnigen Böden zeitabhängige und irreversible Bodenverformungen hervorrufen. Diese Prozesse führen zu Spannungsumlagerungen entlang des Pfahlschafts und können Pfahlkopfverformungen, die Normalkraftübertragung sowie die Ausbildung von Dragdown maßgeblich beeinflussen.

Solche Effekte lassen sich mit konventionellen thermo-elastischen oder vereinfachten thermo-elasto-plastischen Ansätzen nicht konsistent erfassen. Vor diesem Hintergrund wird in der vorliegenden Arbeit das Stoffmodell AVISA-T eingesetzt, das einen einheitlichen konstitutiven Rahmen zur Beschreibung des thermo-mechanischen sowie zeitabhängigen Bodenverhaltens bereitstellt und damit speziell für die Bemessung von Energiepfählen geeignet ist.

2.1 Modellkonzept und wesentliche Merkmale

AVISA-T [28] ist ein thermo-visko-hypoplastisches Stoffmodell, das für feinkörnige Böden entwickelt wurde. Es basiert auf einer hypoplastischen Formulierung und erweitert diese durch die konsistente Berücksichtigung viskoser und thermischer Effekte:

$$\dot{\sigma} = mE : [(\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}^{TE}) - y_h Y \|\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}^{TE}\| \mathbf{m} - \dot{\epsilon}^{vis} - \dot{\epsilon}^{TP}] \quad (1)$$

Hierbei bezeichnet $\dot{\sigma}$ den Spannungsgeschwindigkeitstensor zweiter Ordnung, E den Tangentensteifigkeitstensor vierter Ordnung, und m eine skalare Funktion, welche die Steifigkeitszunahme bei Lastumkehr oder zyklischer Beanspruchung beschreibt.

Die wesentlichen Merkmale des Modells sind:

- thermo-elastisches Bodenverhalten, beschrieben durch, $\dot{\epsilon}^{TE} = \frac{\alpha_s}{3} \dot{T} \mathbf{1}$,
- thermo-plastisches Bodenverhalten, das durch Temperaturänderungen induziert und über $\dot{\epsilon}^{TP}$ erfasst wird,
- zeitabhängige Deformationsmechanismen, einschließlich Krieche- und Relaxationsprozessen, beschrieben durch $\dot{\epsilon}^{vis}$,
- Kleinverzerrungssteifigkeitseffekte, die eine realistische Abbildung des Bodenverhaltens bei sehr kleinen Dehnungen ermöglichen und über die Variablen m und y_h berücksichtigt werden,

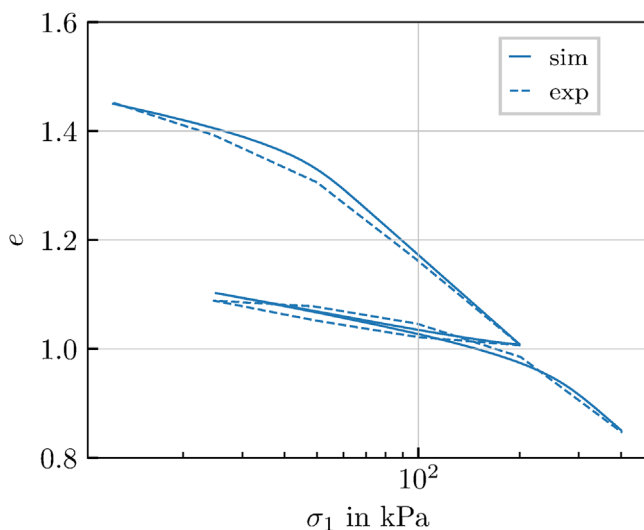
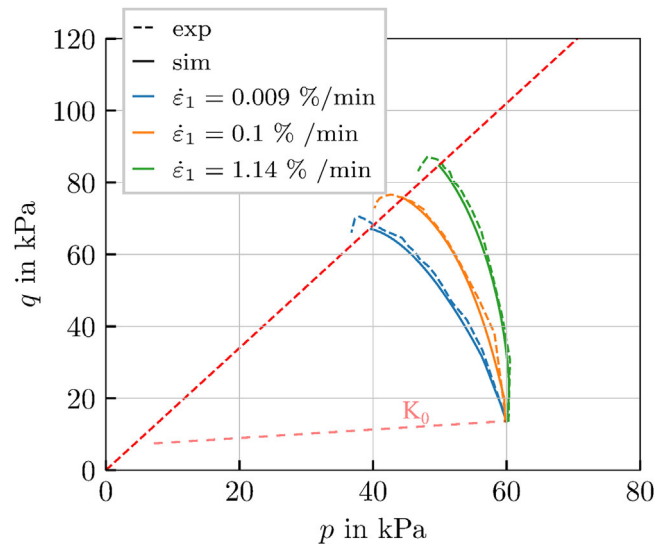
Tab. 1 Materialparameter [21]
Model parameters [21]

Bodenart	SC
λ	0,228
κ	0,045
e_{i0}	2,22
ν	0,15
M_c	1,7
I_v	0,055
n_T	0,04
$l_T/^\circ\text{C}$	0,03
α_s	$3,5 \cdot 10^{-5}$
γ_T	2,5
γ_E	2,5

– eine vollständig gekoppelte thermo-mechanische Formulierung, die die gleichzeitige Berücksichtigung mechanischer Belastungen und thermischer Einwirkungen über die allgemeine thermo-mechanische Grundgleichung (Gl. (1)) erlaubt.

Tab. 1 zeigt die kalibrierten Modellparameter für den Sackville Clay (SC), während Bild 1–3 die Modellsimulationen eines Ödometersversuchs sowie zweier undrainierter Triaxialversuche darstellen. Der Ödometersversuch wurde bei Raumtemperatur durchgeführt. Bild 1 belegt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den experimentellen Ergebnissen und den Modellvorhersagen, wobei sowohl der Erstbelastungspfad als auch das Entlastungs- und Wiederbelastungsverhalten realitätsnah erfasst werden.

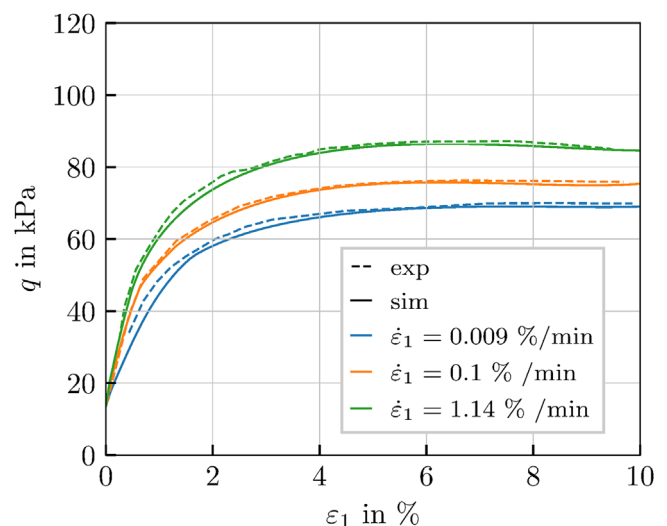
Die Bilder 2 und 3 zeigen das experimentell ermittelte sowie das numerisch simulierte Bodenverhalten unter undrainierter triaxialer Belastung bei einer Temperatur von $T = 10,5^\circ\text{C}$ und variierender axialer Dehnungsrate (Vorschubgeschwindigkeit). Die Versuche starten

**Bild 1** Ödometrischer Kompressionsversuch an einer Sackville-Clay-Probe [33] bei Raumtemperatur einschließlich Belastungs-, Entlastungs- und Wiederbelastungsphase [21]
Oedometric compression test of a Sackville Clay sample [33] at room temperature including loading, unloading, and reloading [21]**Bild 2** Vergleich der gemessenen [33] und numerisch vorhergesagten effektiven Spannungspfade (p' - q -Raum) für undrainierte triaxiale Kompressionsversuche an anisotrop konsolidiertem Sackville Clay bei unterschiedlichen Dehnungsraten, durchgeführt bei konstanter Temperatur von $T = 10,5^\circ\text{C}$ [21]

Measured [33] versus predicted responses in the p' - q space for undrained triaxial compression tests on anisotropically consolidated Sackville clay at different strain rates, conducted at a constant temperature of $T = 10,5^\circ\text{C}$ [21]

aus einem anisotropen Anfangsspannungszustand mit $p_0 = 60\text{ kPa}$ und $q_0 \approx 18\text{ kPa}$. Trotz des vergleichsweise hohen Reibungswinkels von $\varphi_c = 41,5^\circ$ entsprechend $M_c = 1,7$ für einen Ton ist das Modell in der Lage, sowohl die Scherfestigkeit des Bodens als auch die beobachtete Dehnratenabhängigkeit mit guter Genauigkeit abzubilden.

Darüber hinaus zeigt Bild 4 eine qualitative ödometrische Simulation mit 12 thermischen Zyklen bei einer

**Bild 3** Vergleich der gemessenen [33] und simulierten Spannungspfade (ϵ_1 - q -Raum) für undrainierte triaxiale Kompressionsversuche an anisotrop konsolidiertem Sackville Clay bei unterschiedlichen Dehnungsraten, durchgeführt bei konstanter Temperatur von $T = 10,5^\circ\text{C}$ [21]

Measured [33] versus predicted responses in the ϵ_1 - q space for undrained triaxial compression tests on anisotropically consolidated Sackville Clay at different strain rates, conducted at a constant temperature of $T = 10,5^\circ\text{C}$ [21]

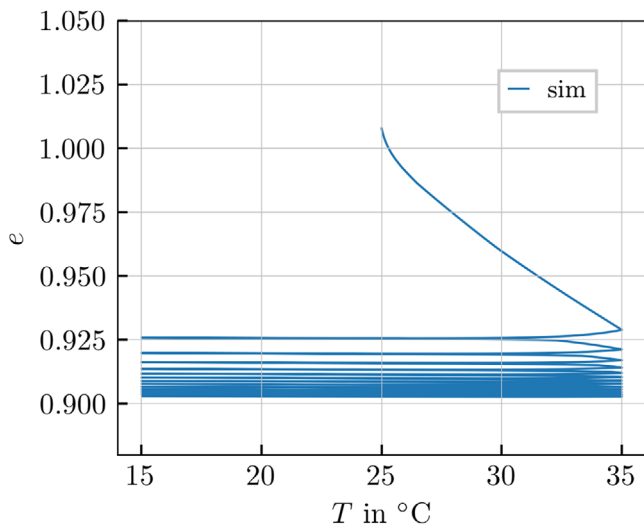


Bild 4 Qualitative ödometrische Simulation mit 12 thermischen Heiz-/Kühlzyklen mit $\Delta T = 10^\circ$ auf Basis der für Sackville Clay kalibrierten Modellparameter
A qualitative oedometric simulation with 12 thermal heating/cooling cycles of $\Delta T = 10^\circ$ using the parameters calibrated for Sackville Clay

Temperaturamplitude von $\Delta T = 10^\circ$, die unter konstanter mittlerer effektiver Spannung unter Verwendung der für Sackville Clay kalibrierten Modellparameter durchgeführt wurde. Die größten Verformungen treten beim normal konsolidierten Zustand während des ersten thermischen Zyklus auf, während nachfolgende Zyklen zu einer zunehmend geringeren volumetrischen Verdichtung der Probe führen.

3 Finite-Elemente-Simulation von Energiepfählen

Zur Untersuchung des gekoppelten thermo-mechanischen Verhaltens von Energiepfählen unter realistischen Betriebsbedingungen werden im Folgenden numerische Simulationen auf Basis der Finite-Elemente-Methode mit PLAXIS vorgestellt. Ziel ist es, die durch thermische und mechanische Beanspruchungen hervorgerufenen Spannungen, Verformungen und Umlagerungsprozesse im Pfahl-Boden-System abzubilden und deren zeitliche Entwicklung zu analysieren.

Ein großmaßstäblicher Ort beton-Energiepfahl (Durchmesser $D = 380$ mm, Länge $L = 10,3$ m) wurde in Delft (Niederlande) in geschichtetem Weichboden (Bild 5) untersucht und in [34] beschrieben. Der Pfahl war mit Doppel-U-förmigen HDPE-Wärmetauscherrohren ausgestattet, wie in Bild 5 schematisch dargestellt, und über seine Länge mit Schwingdraht-Dehnungsmessern sowie Thermistoren instrumentiert. Zusätzlich wurde am Pfahlkopf ein LVDT-Wegaufnehmer installiert. Es wurden zwei Lastszenarien untersucht: (i) eine mechanische Belastung entsprechend 60 % der Pfahltragfähigkeit und (ii) eine thermische Beanspruchung, die über eine Wärmepumpenanlage (GSHP) eingeleitet wurde, ebenfalls schematisch in Bild 5 dargestellt. Weitere Details sind [34] zu entnehmen.

Zur numerischen Analyse wurde ein zweidimensionales, rotationssymmetrisches Finite-Elemente-Modell ent-

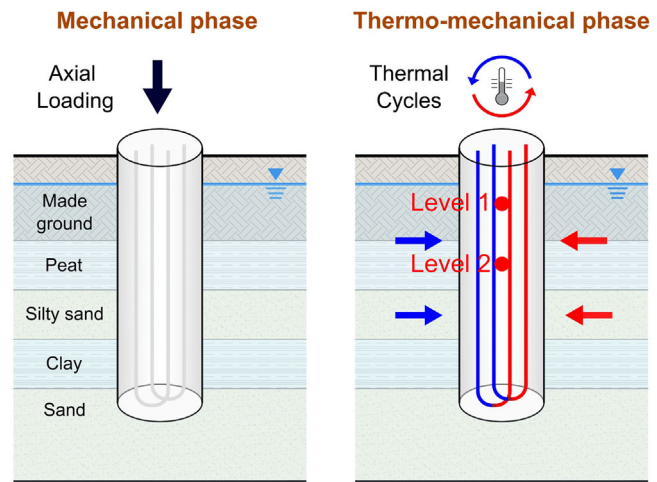


Bild 5 Schematische Darstellung des Feldversuchs mit mechanischen und thermomechanischen Belastungsphasen
Schematic representation of the field test with mechanical and thermo-mechanical loading phases

wickelt, das einen einzelnen Energiepfahl (Radius von 0,19 m, Länge von 10,3 m) in einem geschichteten Bodenprofil abbildet, entsprechend den in [29, 30] beschriebenen Modellen. Das Finite-Elemente-Modell wurde ausreichend groß gewählt, um Randeinflüsse zu minimieren; geeignete mechanische, hydraulische und thermische Randbedingungen wurden definiert. Die thermo-mechanische Beanspruchung erfolgte über zeitabhängige Temperaturverläufe, die den Betriebsbedingungen einer Erdwärmepumpenanlage entsprachen. Dabei wurden eine Wärmeleitung und eine anfängliche Bodentemperatur von 12°C angenommen.

Die anhand von CPT-Sondierungen identifizierten Bodenschichten (Bild 5) wurden mit dem Stoffmodell AVISA-T modelliert. Die Kalibrierung erfolgte auf Grundlage von Elementversuchen bzw. Felddaten. Der Pfahl selbst wurde als linear-elastisches Betonmaterial angenommen. Die Pfahl-Boden-Interaktion wurde über starre Kontakte in Normalenrichtung sowie tangential Coulomb-Reibung abgebildet. Die numerischen Simulationen wurden unter Verwendung einer vollständig gekoppelten thermo-mechanischen Formulierung im PLAXIS durchgeführt. Die für die Simulationen verwendeten Modellparameter sind in Tab. 2 und 3 zusammengestellt.

3.1 Ergebnisse der mechanischen Belastungsphase

Bild 6 zeigt die Ergebnisse des Versuchs mit mechanischer Belastung zusammen mit der entsprechenden numerischen Simulation, dargestellt im Diagramm der Pfahlkopfverschiebung in Abhängigkeit von der aufgebrachten Last. Das Pfahlverhalten ist durch einen deutlich nichtlinearen Anstieg der Verschiebung mit zunehmender Last gekennzeichnet. Über den gesamten untersuchten Lastbereich hinweg zeigt das numerische Modell eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messdaten und belegt damit seine Fähigkeit, das lastabhängige

Tab. 2 Parameter des verwendeten Stoffmodells nach [29]
Material model parameters [29]

	Parameter	Aufgeschütteter Boden	Torf	Schluffiger Sand	Ton	Sand
Thermo-mechanisches Modell (AVISIA-T)	λ	2,0	2,0	0,07	0,095	0,063
	κ	0,3	0,3	0,011	0,03	0,0099
	ν	0,3	0,3	0,25	0,25	0,21
	e_{i0}	7,5	7,5	0,8	1,4	0,75
	φ_c	27	23	28	23	31
	n_T	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03
	l_T	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
	γ_T	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Thermische Parameter (Plaxis)	c in MJ/(m ³ · K)	1,52	0,89	2,8	2,5	2,4
	k_T in W/(m · K)	1,12	0,54	1,6	1,35	1,9
	α_s in (1/°K)	$4 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$18 \cdot 10^{-6}$	$6,6 \cdot 10^{-6}$	$20 \cdot 10^{-6}$

Tab. 3 Materialparameter des linear-elastischen Betonpfahls [29]
Parameters of the concrete pile [29]

	Parameter	Wert
Mechanische Parameter	E in GPa	41
	ν	0,2
Thermische Parameter	c in MJ/(m ³ · K)	1
	k_T in W/(m · K)	2,1
	α_s in 1/°K	$10,71 \times 10^{-6}$

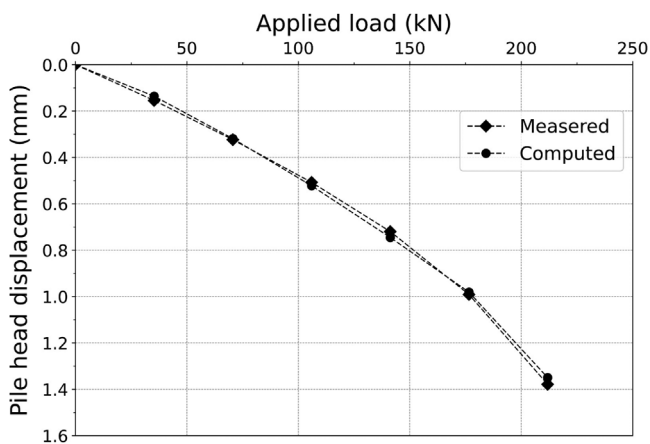


Bild 6 Gemessene und berechnete Pfahlkopfverschiebung im Verhältnis zur aufgetragenen mechanischen Belastung [30]
Measured and computed pile head displacement versus the applied mechanical load [30]

Verformungsverhalten des Pfahls realitätsnah abzubilden [29, 30].

3.2 Ergebnisse der thermischen Belastungsphase

In den numerischen Simulationen wurden die im Feldversuch gemessenen Temperaturprofile direkt als vorgegebene thermische Randbedingungen angesetzt. Dabei wurde sowohl für den Pfahl als auch für den Boden eine anfänglich homogene Temperatur von 12°C angenommen. Bild 7 zeigt die gemessenen und in der Simulation

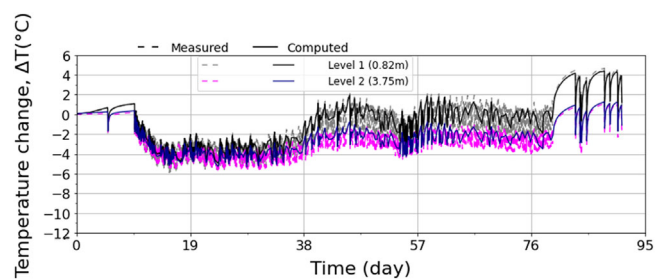


Bild 7 Temperaturverlauf entlang des Pfahlschafts [29]
Temperature history along the pile shaft [29]

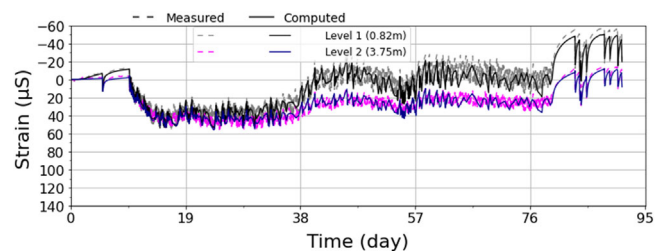


Bild 8 Vergleich der berechneten und gemessenen thermisch induzierten axialen Dehnungen entlang des Pfahlschafts während der thermischen Belastung in Abhängigkeit von der verstrichenen Zeit [29]
Computed vs. measured thermally induced axial strain along the pile shaft during thermal loading versus elapsed time [29]

vorgegebenen Temperaturvariationen für den betrachteten Versuch mit zyklischer Temperaturänderung auf den Niveaus 1 und 2, die im Fokus dieser Arbeit stehen und in Bild 5 dargestellt sind.

Die Temperaturverteilung entlang der Pfahltiefe ist inhomogen, mit einer mittleren Temperaturänderung von etwa 5°C. Am Ende des Versuchs verbleiben residuale Temperaturunterschiede, die auf die unterschiedliche thermische Trägheit von Pfahl und umgebendem Boden zurückzuführen sind.

Bild 8 zeigt die gemessenen und numerisch simulierten thermisch induzierten axialen Dehnungen auf den Niveaus 1 und 2. Die während des Betriebs der Erdwärmepumpe auftretende Abkühlung führt zu einer thermischen Kontraktion des Pfahls, während die anschließende

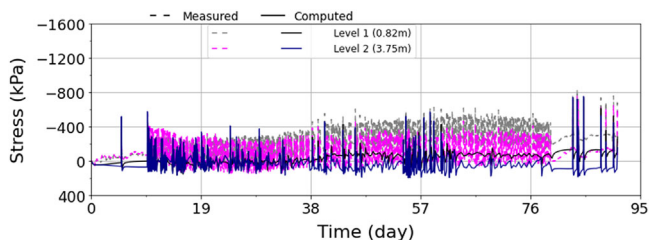


Bild 9 Vergleich der berechneten und gemessenen thermisch induzierten axialen Spannungen entlang des Pfahlschafts während der thermischen Belastung in Abhängigkeit von der verstrichenen Zeit [29]
Computed vs. measured thermally induced axial stresses along the pile shaft during thermal loading versus elapsed time [29]

natürliche Erwärmung einen teilweisen Rückgang dieser Kontraktion bewirkt und zur Expansion führt. Die Entwicklung der Dehnungen folgt eng den Temperaturänderungen, wobei am Ende des Versuchs residuale Dehnungen verbleiben.

Das numerische Modell bildet sowohl die Größenordnung als auch die zeitliche Entwicklung der gemessenen Dehnungen auf diesen Niveaus entlang des Pfahlschafts sehr gut ab. Die verbleibenden Residualdehnungen stehen im Einklang mit der residualen Temperaturverteilung entlang des Pfahls und spiegeln die unterschiedliche thermische Reaktion des Pfahl–Boden-Systems wider.

Bild 9 zeigt die gemessenen und numerisch simulierten thermisch induzierten axialen Spannungen auf den Niveaus 1 und 2. Während der Abkühlung entwickeln sich sowohl Druck- als auch Zugspannungen, was verdeutlicht, dass während des Betriebs einer Erdwärmepumpenanlage Zug- und Druckspannungszustände innerhalb des Pfahls gleichzeitig auftreten können. Am Ende des Versuchs verbleiben residuale Zugspannungen in den oberen Bereichen, die vom numerischen Modell gut reproduziert werden.

Dieses Verhalten ist im Wesentlichen auf die inhomogene Temperaturverteilung entlang des Pfahls infolge des intermittierenden GSHP-Betriebs zurückzuführen, die zu residualen thermisch induzierten Dehnungen und Spannungen führt und damit im Einklang mit früheren numerischen Untersuchungen steht. Das Modell prognostiziert ausgeprägte zyklische Spannungsänderungen als Reaktion auf den in Bild 7 dargestellten Temperaturverlauf, die in den In-situ-Messungen nicht in gleichem Maße beobachtet werden. Diese Abweichung ist auf die idealisierten thermischen Randbedingungen in der numerischen Modellierung zurückzuführen, wie sie in Bild 7 dargestellt wurden.

4 Zusammenfassung

Diese Arbeit fasst das thermo-visko-hypoplastische Stoffmodell AVISA-T [28] zusammen, das zur Beschreibung des gekoppelten thermo-mechanischen Verhaltens gesättigter feinkörniger Böden unter monotoner und zyklischer Belastung entwickelt wurde. Aufbauend auf einem hypoplastischen Stoffmodell mit Intergranular-Strain-

Anisotropie behält das Modell zentrale Eigenschaften der Grundformulierung bei, darunter inhärente Anisotropie, Ratenabhängigkeit und Kleinverzerrungssteifigkeit, und erweitert diese gezielt um temperaturabhängige Effekte, die für ingenieurpraktische Anwendungen relevant sind.

Thermische Einflüsse werden über temperaturabhängige Modifikationen der Normalkompressionslinie, der Referenzporenzahl sowie der Wiederbelastungssteifigkeit berücksichtigt, welche gemeinsam die Entwicklung der scheinbaren Vorbelastungsspannung steuern. Die Formulierung erfasst sowohl teilweise irreversible thermische Expansion als auch thermisch induzierte irreversible Kompression. In Kombination mit der ISA-Formulierung (intergranulare Dehnung) können zudem thermische Shakedown-Effekte realitätsnah abgebildet werden. Diese Erweiterungen ermöglichen es AVISA-T, wesentliche thermo-mechanische Kopplungsmechanismen feinkörniger Böden konsistent zu reproduzieren.

Die Modellleistung wurde in [28] anhand umfangreicher Laborversuche bewertet, darunter isotrope Kompression, drainierte und undrainierte monotone und zyklische Triaxialversuche, Ödometerversuche sowie thermisch-zyklische Tests an unterschiedlichen feinkörnigen Böden. Die Simulationen zeigen, dass AVISA-T die erhöhte Kompressibilität bei erhöhten Temperaturen, die unterschiedlichen Reaktionen normal- und überkonsolidierter Böden, die Dehnungsakkumulation und Steifigkeitsdegradation unter zyklischer Belastung sowie thermisches Shakedown-Verhalten mit initial irreversiblen Verformungen und anschließender Stabilisierung zuverlässig erfasst.

Über die Validierung auf Elementebene hinaus wurde die Anwendbarkeit von AVISA-T auf Randwertprobleme durch die Implementierung in Finite-Elemente-Programmen (Abaqus und PLAXIS) gezeigt [29, 30]. Insbesondere wurde das Modell zur Simulation des thermo-mechanischen Verhaltens eines im weichen Boden teilauffliegenden Energiepfahls unter langzeitiger Erwärmung/Abkühlung eingesetzt. Nach Kalibrierung anhand nichtisothermer Laborversuche konnten die numerischen Simulationen das Verhalten großmaßstäblicher In-situ-Energiepfahlversuche unter unterschiedlichen mechanischen und thermischen Lastbedingungen realitätsnah reproduzieren. Dabei werden zentrale Mechanismen des Energiepfahlverhaltens erfasst, darunter die Spannungsumlagerung entlang des Pfahlschafts, das gleichzeitige Auftreten von Zug- und Druckspannungen, thermisch induzierte Pfahlkopfhebungen bei geringen mechanischen Lasten sowie begrenzte, aber irreversible Setzungen bei höheren axialen Lastniveaus.

Die Ergebnisse bestätigen, dass eine physikalisch fundierte thermoplastische Stoffmodellierung für die realistische Prognose des Langzeitverhaltens von Energiepfählen wichtig ist. Bei geeigneter Kalibrierung stellt AVISA-T ein robustes und zuverlässiges Werkzeug zur Analyse thermo-mechanisch beanspruchter geotechnischer Strukturen dar und bietet deutliche Vorteile gegenüber

vereinfachten thermo-elastischen oder thermo-elasto-plastischen Ansätzen. Zukünftige Arbeiten werden sich auf die Anwendung des Modells auf weitere Fallstudien und betriebliche Szenarien der Energiegeotechnik konzentrieren.

Danksagung

Die Erstautorin bedankt sich für die finanzielle Unterstützung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Emmy-Noether-Programms innerhalb der Forschungsgruppe „Optimierung der hydrothermalen Erdwärmenutzung durch Hochskalierung thermo-hydro-visko-mechanischer Bodenprozesse (THVMupscale)“.

Literatur

- [1] Cen, D.; Xia, C. (2025) *Review on heat transfer and thermo-mechanical behaviour of energy geostructures*. Underground Space 26, S. 36–81. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2025.06.003>
- [2] Meibodi, S. S.; Loveridge, F. (2022) *The future role of energy geostructures in fifth generation district heating and cooling networks*. Energy 240, Art. 122481. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122481>
- [3] Zhao, R.; Shao, C.; Knappett, J. A.; Leung, A. K.; Liang, T.; Zhan, L. T.; Chen, Y. M. (2025) *Centrifuge modelling of energy geostructures in soil: A review*. Geomechanics for Energy and the Environment 43, Art. 100719. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2025.100719>
- [4] Hashemi, A.; Sutman, M.; Abuel-Naga, H. (2022) *Thermomechanical response of kaolin clay–concrete interface in the context of energy geostructures*. Canadian Geotechnical Journal 60, H. 3, S. 380–396. <https://doi.org/10.1139/cgj-2022-0172>
- [5] Salciarini, D.; Gerola, M.; De Feudis, S.; Lupattelli, A.; Dalla Santa, G.; Capati, G. et al. (2025) *Database-driven analysis of energy geostructures using a global dataset: Diffusion, efficiency, and environmental performance*. Renewable Energy 256, Part F, Art. 124373. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.124373>
- [6] Deangeli, C.; Barla, M.; Sterpi, D. (2024) *Failure and Deformation Behavior of Underground Geo-Structures: Advances in Geomechanics*. Applied Sciences 14, H. 11, Art. 4526. <https://doi.org/10.3390/app14114526>
- [7] Barla, M.; Insana, A.; Cecinato, F.; Blessent, D.; Pedretti, D.; Cerutti, P. (2022) *Heat exploitation from the ground*. Acque Sotteranee 11, H. 3, Part 2 (Supplements and Attachments), S. 33–37.
- [8] Houhou, R.; Laloui, L. (2022) *Geomechanics for energy and the environment: Current developments*. Geomechanics for Energy and the Environment 32, Art. 100345. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2022.100345>
- [9] Mhamdi Alaoui, H.; Zhao, C.; Niu, W.; Yang, Z. (2024) *Investigating temperature effects on the shear behavior of clays: molecular dynamics simulations*. Canadian Geotechnical Journal 62, S. 1–23. <https://doi.org/10.1139/cgj-2024-0471>
- [10] Bentil, O. T.; Zhou, C. (2022) *Effects of temperature and thermal cycles on the elastic shear modulus of saturated clay*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 148, H. 7, Art. 06022006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002822](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002822)
- [11] Babi, S.; Tuttolomondo, A.; Laloui, L. (2025) *Experimental quantification of capillary and adsorbed water in active clays for hydro-mechanical modelling*. Canadian Geotechnical Journal 62, S. 1–18. <https://doi.org/10.1139/cgj-2025-0323>
- [12] Xiao, Y.; Sun, Z.; Wang, N.; Guo, H.; Wu, H.; Meng, M. (2024) *Thermo-mechanical behavior of sand-clay mixtures. Part I: experimental study*. Acta Geotechnica 19, H. 6, S. 3377–3387. <https://doi.org/10.1007/s11440-023-02124-8>
- [13] Cekerevac, C.; Laloui, L. (2004) *Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 28, H. 3, S. 209–228. <https://doi.org/10.1002/nag.332>
- [14] Di Donna, A.; Laloui, L. (2015) *Response of soil subjected to thermal cyclic loading: Experimental and constitutive study*. Engineering Geology 190, S. 65–76. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.03.003>
- [15] Pan, Y.; Gong, X.; Rotta Loria, A. F. (2024) *Thermal shakedown in granular materials with irregular particle shapes*. Scientific reports 14, H. 1, Art. 6828. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57503-2>
- [16] Guo, Y.; Golchin, A.; Hicks, M. A.; Liu, S.; Zhang, G.; Vardon, P. J. (2023) *Experimental investigation of soil–structure interface behaviour under monotonic and cyclic thermal loading*. Acta Geotechnica 18, H. 7, S. 3585–3608. <https://doi.org/10.1007/s11440-022-01781-5>
- [17] Kolymbas, D.; Herle, I.; Von Wolffersdorff, P. A. (1995) *Hypoplastic constitutive equation with internal variables*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 19, H. 6, S. 415–436. <https://doi.org/10.1002/nag.1610190604>
- [18] Mašin, D.; Khalili, N. (2012) *A thermo-mechanical model for variably saturated soils based on hypoplasticity*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 36, H. 12, S. 1461–1485. <https://doi.org/10.1002/nag.1058>
- [19] Ma, Q. J.; Ng, C. W. W.; Mašin, D.; Zhou, C. (2017) *An approach for modelling volume change of fine-grained soil subjected to thermal cycles*. Canadian Geotechnical Journal 54, H. 6, S. 896–901. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0459>
- [20] Pico, M.; Mašin, D. (2024) *Coupled thermo-hydro-mechanical hypoplastic model for partially saturated fine-grained soils under monotonic and cyclic loading*. Computers and Geotechnics 172, Art. 106447. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106447>
- [21] Tafili, M. (2025) *Modeling Temperature-and Rate-Dependent Behavior of Soft Soils: A Thermo-Visco-Hypoplastic Approach*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 49, H. 8, S. 2076–2091. <https://doi.org/10.1002/nag.3976>
- [22] Tafili, M.; Triantafyllidis, T. (2020) *AVISA: anisotropic visco-ISA model and its performance at cyclic loading*. Acta Geotechnica 15, H. 9, S. 2395–2413. <https://doi.org/10.1007/s11440-020-00925-9>
- [23] Tafili, M.; Staubach, P.; Macháček, J.; Zachert, H.; Wichtmann, T. (2025) *Predictive abilities of constitutive models for clay under monotonic and cyclic loading: element tests and centrifuge experiments*. Géotechnique 75, H. 5, S. 595–611. <https://doi.org/10.1680/jgeot.23.00268>
- [24] Tafili, M.; Ganal, A.; Wichtmann, T.; Reul, O. (2023) *On the AVISA model for clay – Recommendations for calibration and verification based on the back analysis of a piled raft*. Computers and Geotechnics 154, Art. 105126. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.105126>
- [25] Tafili, M.; Dao, D. A.; Grabe, J.; Wichtmann, T. (2025) *Simulation of large displacements during lateral pile loading in anisotropic, overconsolidated fine-grained soils in: Abadie, C.; Thorel, L.; Blanc, M.; Li, Z. [eds] Proceedings of ISFOG 2025. 5th International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics. Nantes, 9–13. Juni 2025. London: ISSMGE, S. 1–6. https://doi.org/10.53243/ISFOG2025-61*
- [26] Tafili, M.; Triantafyllidis, T.; Wichtmann, T. (2023) *Validierung des anisotropen visko ISA Modells (AVISA) für bindige Böden*. Geotechnik 46, H. 1, S. 28–37. <https://doi.org/10.1002/gete.202000003>

- [27] Dao, D. A.; Tafili, M.; Williams-Riquer, F.; Grabe, J.; Wichtmann, T. (2025) *Large deformation simulations of structure–soil-interaction in anisotropic fine-grained soils*. Computers and Geotechnics 188, Art. 107537. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2025.107537>
- [28] Ashrafi, M.; Tafili, M.; Wichtmann, T. (2025) *A Thermo-Mechanical Constitutive Model for Fine-Grained Soils under Cyclic and Monotonic Loading*. Géotechnique (zur Veröffentlichung angenommen).
- [29] Rafai, M.; Tafili, M.; Dong, Y.; Vardon, P. J. (2026) *Thermoplastic response of energy piles during long-term monotonic cooling*. Computers and Geotechnics 191, Art. 107839. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2025.107839>
- [30] Rafai, M.; Tafili, M.; Dong, Y.; Vardon, P. J. (2026) *Thermoplastic analyses of energy pile in soft soils*. Acta Geotechnica (zur Veröffentlichung angenommen).
- [31] Bourne-Webb, P. J.; Amatya, B.; Soga, K.; Amis, T.; Davidson, C.; Payne, P. (2009) *Energy pile test at Lambeth College, London: geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles*. Géotechnique 59, H. 3, S. 237–248. <https://doi.org/10.1680/geot.2009.59.3.237>
- [32] Bourne-Webb, P. J.; Lupattelli, A.; Freitas, T. M. B.; Salciarini, D. (2022) *The influence of initial shaft resistance mobilisation in the response of seasonally, thermally-activated pile foundations in granular media*. Geomechanics for Energy and the Environment 32, Art. 100299. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2021.100299>
- [33] Hinchberger, S. D.; Rowe, R. K. (2005) *Evaluation of the predictive ability of two elastic-viscoplastic constitutive models*. Canadian Geotechnical Journal 42, H. 6, S. 1675–1694. <https://doi.org/10.1139/t05-082>
- [34] Rafai, M.; Salciarini, D.; Vardon, P. J. (2024). *Full-scale in-situ tests on a displacement cast in situ energy pile: Effects of cyclic thermal loads under different mechanical load levels on pile stress and strain*. Geomechanics for Energy and the Environment 40, Art. 100606. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2024.100606>

Autor:innen

Dr.-Ing. Merita Tafili (Korrespondenzautor:in)

merita.tafili@rub.de

Ruhr-Universität Bochum
Universitätsstraße 150
44801 Bochum

Dr. Mouadh Rafai

moura@dtu.dk

Technical University of Denmark
Anker Engelunds Vej 1
Building 101A
DK-2800 Kgs Lyngby

Dr. Mohammad Javad Salimi

mohammad.salimi@rub.de

Ruhr-Universität Bochum
Universitätsstraße 150
44801 Bochum

Mohammadsadegh Ashrafi

mohammadsadegh.ashrafi@rub.de

Ruhr-Universität Bochum
Universitätsstraße 150
44801 Bochum

Prof. Dr. Phil Vardon

P.J.Vardon@tudelft.nl

Delft University of Technology
Postbus 5
NL-2600 AA Delft

Prof. Dr.-Ing. habil. Torsten Wichtmann

torsten.wichtmann@rub.de

Ruhr-Universität Bochum
Universitätsstraße 150
44801 Bochum

Zitieren Sie diesen Beitrag

Tafili, M.; Rafai, M.; Salimi, M. J.; Ashrafi, M.; Vardon, P.; Wichtmann, T. (2026) *Bedeutung thermoplastischer Stoffmodelle für die Bemessung von Energiepfählen*. Bautechnik, 1–8.

<https://doi.org/10.1002/bate.70101>