

Baugrundverhalten und seine Abbildung in Materialmodellen

Michael Kupka & Ivo Herle

*Professur für Bodenmechanik und Grundbau, Technische Universität
Dresden*

Kurzfassung: Insbesondere komplexe geotechnische Baumaßnahmen im urbanen Umfeld erfordern die Prognose der während des Bauprozesses stattfindenden Boden- und Bauwerksverformungen (siehe Abbildung 1). Hierfür stehen dem Ingenieur Hilfsmittel wie die Finite-Elemente-Methode zur Verfügung, mit der das Bodenverhalten durch Materialmodelle wiedergegeben werden kann. Je nach Güte der Stoffgesetze sind dabei mehr oder weniger realitätsnahe Ergebnisse zu erwarten. Im Folgenden werden ausgewählte Bodenphänomene beschrieben und auf ihre Abbildung in Materialmodellen eingegangen. Eine im Rahmen des Geo-TechControl-Projektes aufgebaute Klassifizierung von Stoffgesetzen sowie das entwickelte Auswahlverfahren zur Bestimmung geeigneter Stoffgesetze werden vorgestellt.

1 Bodenverhalten

Boden als Baugrund bzw. Baustoff weist gegenüber klassischen Baumaterialien wie Beton oder Stahl ein sehr komplexes Materialverhalten auf. Sein Verhalten hängt dabei nicht nur vom Bodentyp ab sondern auch von der Belastungsgeschichte, dem Zustand des Bodens (Dichte und Spannung) und der Drainagemöglichkeit ab (u.a.). Einzelne Bodenphänomene werden im Folgenden anhand von Elementversuchen (Proben mit homogenem Spannungs- und Verformungszustand) dargestellt. Beispiele hierfür sind Ödometer- (einaxiale Kompression) und Triaxialversuche (Scherbeanspruchung).

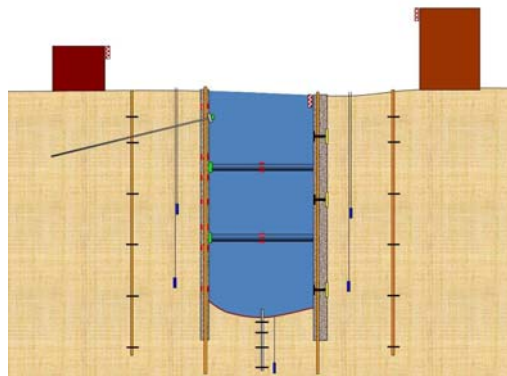


Abbildung 1: Instrumentierung einer innerstädtischen Baugrube [Getec UK 2011]

1.1 Bodensteifigkeit

Die Steifigkeit des Bodens hängt sowohl von der Spannung als auch der Belastungsgeschichte ab. So verläuft die Spannungs-Dehnungskurve infolge eindimensionaler Kompression stark nichtlinear (siehe Abbildung 2 rechts). Entsprechend ist der Boden bei geringen Spannungen stark kompressibel und bei hohen Spannungen überproportional gering kompressibel. Bei Entlastung erfolgt dann ein Steifigkeitssprung nach dem wiederum eine spannungsabhängige Steifigkeit beobachtet werden kann. Aufgrund der irreversiblen Kornumlagerungen kommt es nach einer Entlastung zu keiner vollständigen Rückbildung der Verformungen. Der Spannungspfad weist bei Erstbelastung einen linearen Verlauf auf und das Verhältnis der Spannungen bleibt konstant. Hingegen findet bei einer Entlastung ein deutlich langsamerer Abbau der Spannungen in Radialrich-

tung statt. Entsprechend stellt sich während der Entlastung ein nichtlinearer Spannungspfad ein.

1.2 Dichteabhängigkeit des Bodenverhaltens

Die aktuelle Dichte des Bodens beeinflusst deutlich das Materialverhalten. In Abbildung 3 ist dies anhand idealisierter Triaxialversuche mit lockerer sowie dichter Lagerung dargestellt. Der mobilisierte Scherwiderstand dicht gelagerter Proben weist einen Maximalwert mit anschließender Entfestigung auf. Gleichzeitig kommt es nach anfänglicher leichter Verdichtung zu einer Volumenvergrößerung unter Scherung. Der Scherwiderstand lockerer Proben nimmt innerhalb des angenommenen Dehnungsbereiches kontinuierlich zu und ist deutlich geringer als bei dichten Proben. Lockere Proben werden während der Scherung verdichtet. Bemerkenswert ist weiterhin die nach Belastungsumkehr, unabhängig von der Ausgangsdichte auftretende Verdichtung des Bodens.

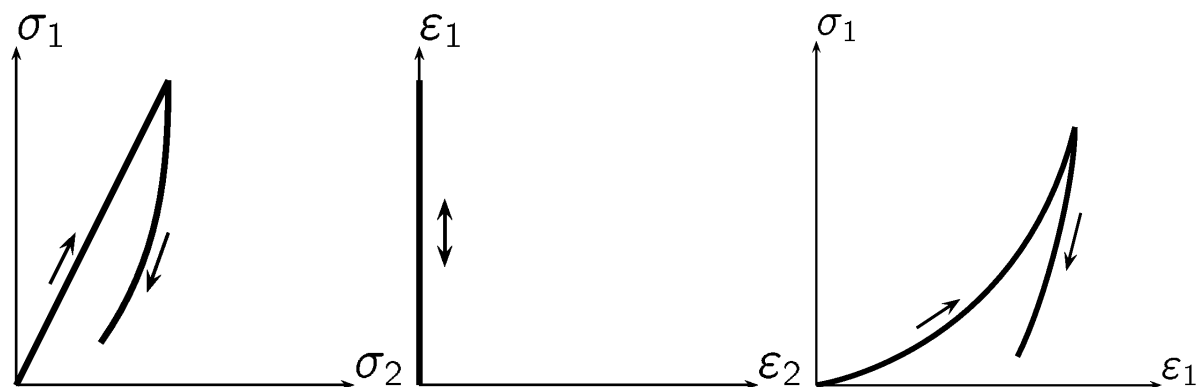


Abbildung 2: Spannungspfad (links), Dehnungspfad (Mitte) und Spannungs-Dehnungskurve (rechts) für eindimensionale Be- und Entlastung, "1" - Axialrichtung, "2" - Radialrichtung [Kolymbas, Herle 2008]

1.3 Weitere Bodenphänomene

Weitere wichtige Bodenphänomene sind z.B. die erhöhte Steifigkeit bei sehr kleinen Dehnungen, die Nichtlinearität der Spannungsgrenzbedingung, viskose Effekte oder auch das Verhalten unter zyklischer Beanspruchung. Die Entwicklung einer Datenbank mit wesentlichen Bodenphänomenen sowie allgemeinen bodenmechanischen Randbedingungen ist ein wichtige Voraussetzung für das GeoTechControl-Projekt.

2 Abbildung des Bodenverhaltens durch Stoffgesetze

Stoffgesetze (Materialmodelle) sind mathematisch-physikalische Beziehungen zur Beschreibung des Bodenverhaltens. Je nach Typ sind sie unterschiedlich gut geeignet, die Bodenphänomene wiederzugeben. Im Folgenden werden drei verschiedene Stoffgesetzklassen kurz vorgestellt.

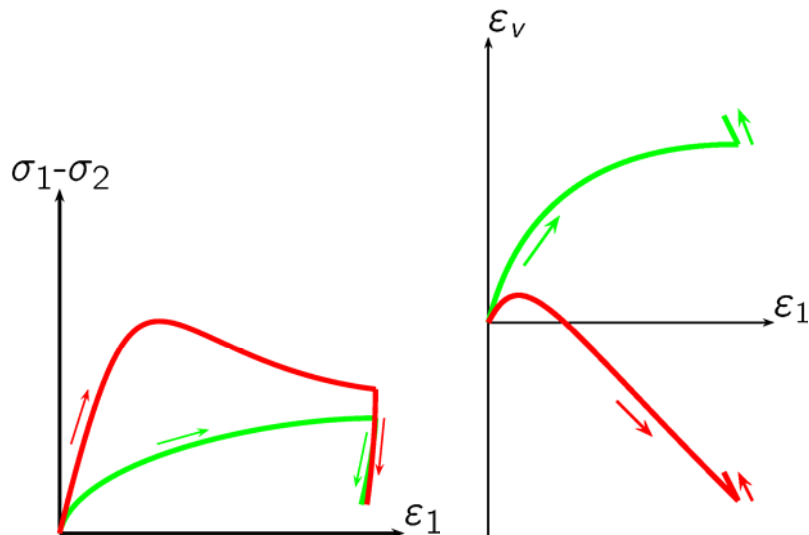


Abbildung 3: Einfluss der Dichte auf den Scherwiderstand (links) einer locker gelagerten (grün) und dicht gelagerten (rot) Probe sowie das volumetrische Änderungsverhalten (rechts) bei triaxialer Scherung

2.1 Lineare isotrope Elastizität

In der linearen Elastizität wird eine direkte Proportionalität zwischen Spannungen und Dehnungen angenommen. Diese wird über den Elastizitätsmodul und die Querdehnzahl bzw. den Schubmodul und den Kompressionsmodul ausgedrückt. Elastische Stoffgesetze eignen sich kaum zur Wiedergabe des komplexen Bodenverhaltens da u.a. keine Spannungsgrenzbedingung berücksichtigt wird.

2.2 Elastizität mit idealer Plastizität

In dieser Stoffgesetzklasse gibt es einen zulässigen elastischen Spannungsbereich der durch eine Grenzbedingung eingeschlossen ist. Unterhalb der Spannungsgrenzbedingung liegt rein elastisches Verhalten vor. Sobald der Spannungszustand auf der Grenzbedingung liegt, können sowohl elastische als auch

plastische Verformungen auftreten. Elastisch-idealplastische Stoffgesetze sind zwar grundsätzlich für Standsicherheitsberechnungen jedoch kaum für Verformungsberechnungen geeignet.

2.3 Hypoplastizität

Die Hypoplastizität ist eine Stoffgesetzklasse, in der keine Unterscheidung zwischen elastischem und plastischem Bodenverhalten vorgenommen wird. Trotz dessen wird die nichtlineare spannungsabhängige Steifigkeit sowie die Druck- und Dichteabhängigkeit des Bodenverhaltens erfasst. Nach größeren Scherwegen werden kritische Zustände erreicht. Hypoplastische Stoffgesetze eignen sich daher sehr gut für eine realitätsnahe Erfassung von Spannungs- und Verformungszuständen.

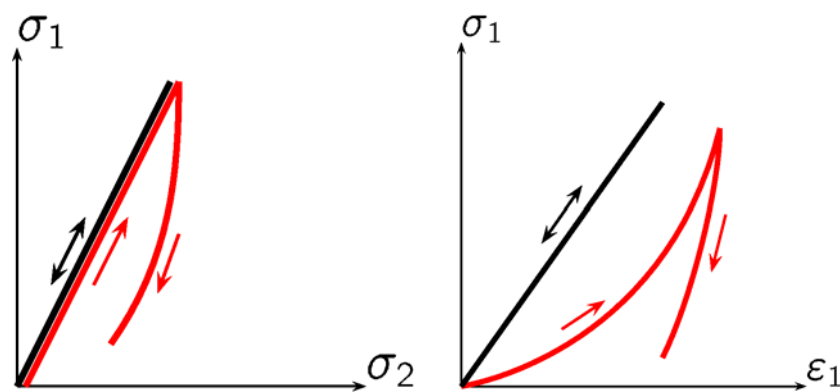


Abbildung 4: Simulierte Spannungspfade (links) und Spannungs-Dehnungskurven (rechts) unter ödometrischen Randbedingungen, Elastizität/Elastoplastizität (schwarz), Hypoplastizität (rot)

2.4 Vergleich der Elastoplastizität und Hypoplastizität für ödometrische und triaxiale Randbedingungen

Elastische sowie einfache elastoplastische Stoffgesetze mit linearer Elastizität können weder die spannungsabhängige Steifigkeit noch die Steifigkeitszunahme infolge einer Entlastung erfassen (siehe Abbildung 4). Sie gehen von einem zustandsunabhängigen, d.h. spannungs- und dichteunabhängigen Bodenverhalten aus. Auch die Belastungsgeschichte wird nicht erfasst. Dementsprechend wird bei Be- und Entlastung der gleiche Spannungspfad sowie die gleiche Spannungs-Dehnungskurve ausgegeben. Daher sind einfache elastoplastische Stoffgesetze

für realitätsnahe Verformungsberechnungen ungeeignet. Fortgeschrittene Stoffgesetze wie z.B. die Hypoplastizität geben beide Bodenphänomene sehr realitätsnah wieder. Auch die Entwicklung der Spannungspfade wird realistisch abgebildet. Sie sollten für realitätsnahe Prognosen von Verformungen eingesetzt werden.

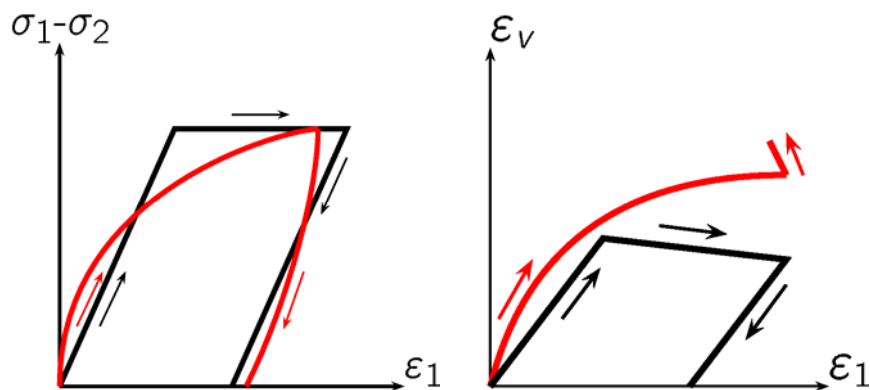


Abbildung 5: Scherwiderstand-Dehnungskurve (links) und Volumenänderungs-Dehnungskurve (rechts) für eine lockere Probe unter triaxialen Randbedingungen, Elastizität/Elastoplastizität (schwarz), Hypoplastizität (rot)

Einfache elastoplastische Stoffgesetze geben das Scherverhalten stark idealisiert wieder (siehe Abbildung 5). Zu Beginn der Scherung steigt der Widerstand linear an und nach Erreichen der Grenzbedingung bleibt der mobilisierte Scherwiderstand konstant. Das Volumen des Bodens verringert sich bei dieser Modellklasse zuerst linear und nimmt nach Erreichen der Fließfläche kontinuierlich zu, sofern der sogenannte Dilatanzwinkel ungleich Null ist. Mit dem fortgeschrittenen hypoplastischen Stoffgesetz kann das Scherverhalten deutlich realitätsnäher prognostiziert werden. Auch die Verdichtung nach Belastungsumkehr wird erfasst.

3 Klassifikation von Stoffgesetzen

Im Rahmen des GeoTechControl-Projektes müssen je nach Problemstellung unterschiedliche Stoffgesetze eingesetzt werden. Voraussetzung ist der Aufbau einer Datenbank mit den Eigenschaften/Fähigkeiten der einzelnen Stoffgesetze. Die Klassifikation erfolgt dabei nach den durch sie darstellbaren Bodenphänomenen sowie der Güte der Übereinstimmung mit der Realität ((+) sehr gute Wiedergabe, (o) näherungsweise Wiedergabe und (-) keine Wiedergabe mög-

lich). Die Klassifizierung anhand der darstellbaren Bodenphänomene erlaubt es auch nicht stoffgesetzespezifisch geschulten Nutzern die Anwendbarkeit bestimmter Stoffgesetze für eine Problemstellung mit bestimmten zu erwartenden Bodenphänomenen zu beurteilen. Die dabei aufgebaute Übersicht ist in verkleinertem Maßstab in Abbildung 6 dargestellt. In diese wurden verschiedene elasto-plastische sowie hypoplastische Stoffgesetze aufgenommen.

Stoffgesetz	Bodentyp		Drain	Undr	Zust	Grenz													
	Sand	Ton					E-sig	Be-Ent	Dichte	Verd	NiLin	3D	Zem	E-Gam	Kriech	Zykl	Aniso-E	Aniso-F	
Mohr-Coulomb	o	o	o	-	-	+	-	-	-	-	-	o	o	-	-	-	-	-	
Drucker-Präger	o	o	o	-	-	+	-	-	-	-	-	-	o	-	-	-	-	-	
Extended Matsuoka-Nakai	o	o	o	-	-	+	-	-	-	-	-	+	o	-	-	-	-	-	
Modified-Cam-Clay	-	+	o	+	+	+	+	+	o	-	o	-	-	o	-	-	-	-	
Hardening-Soil	+	+	+	o	+	+	+	+	o	-	o	o	o	o	-	-	-	-	
3-SKH Hypo-vW-ohne i.D.	-	+	+	+	+	+	+	+	o	-	o	-	o	+	-	o	o	-	
Hypo-vW-mit i.D.	+	-	+	o	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+	+	-	
Hypo-Masin-ohne i.D.	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	o	-	-	o	-	
Hypo-Masin-mit i.D.	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+	+	-	
Hypo-Masin-ohne i.D. (strukturbehaftet)	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	o	-	-	o	-	
Soft-Soil-Creep	-	+	o	o	+	+	+	+	o	-	o	o	-	o	o	-	-	-	

Abbildung 6: Klassifikation der Stoffgesetze hinsichtlich der durch sie darstellbaren Bodenphänomene und möglichen Randbedingungen

4 Auswahl geeigneter Stoffgesetze

Entsprechend der aktuellen Problemstellung müssen durch das GeoTechControl-System geeignete Stoffgesetze für die Berechnung vorgeschlagen werden. Hierfür wurde die in Abbildung 6 dargestellte Auswahlprozedur entwickelt. In Datenbanken sind wichtige Bodenphänomene, Randbedingungen sowie die Fähigkeiten der Stoffgesetze diese wiederzugeben, gespeichert. Der Nutzer muss mittels eines Fragebogens spezifizieren, welche Anforderungen an die Stoffgesetze gestellt werden. Er kann gegebenenfalls gewisse Einschränkungen der Suchergebnisse vornehmen. Bevor der Vergleich zwischen Nutzeranforderung und Stoffgesetzfähigkeiten durchgeführt wird, können einzelne Bodenphänomene gewichtet werden, um die Relevanz der Suchergebnisse zu erhöhen. Anschließend wird durch das System die Übereinstimmung für jedes einzelne Stoffgesetz ermittelt

und eine individuelle Punktzahl berechnet. Die Stoffgesetze mit der höchsten Punktzahl werden anschließend dem Nutzer durch das System vorgeschlagen. Im Folgenden werden einige Aspekte des Verfahrens kurz näher erläutert.

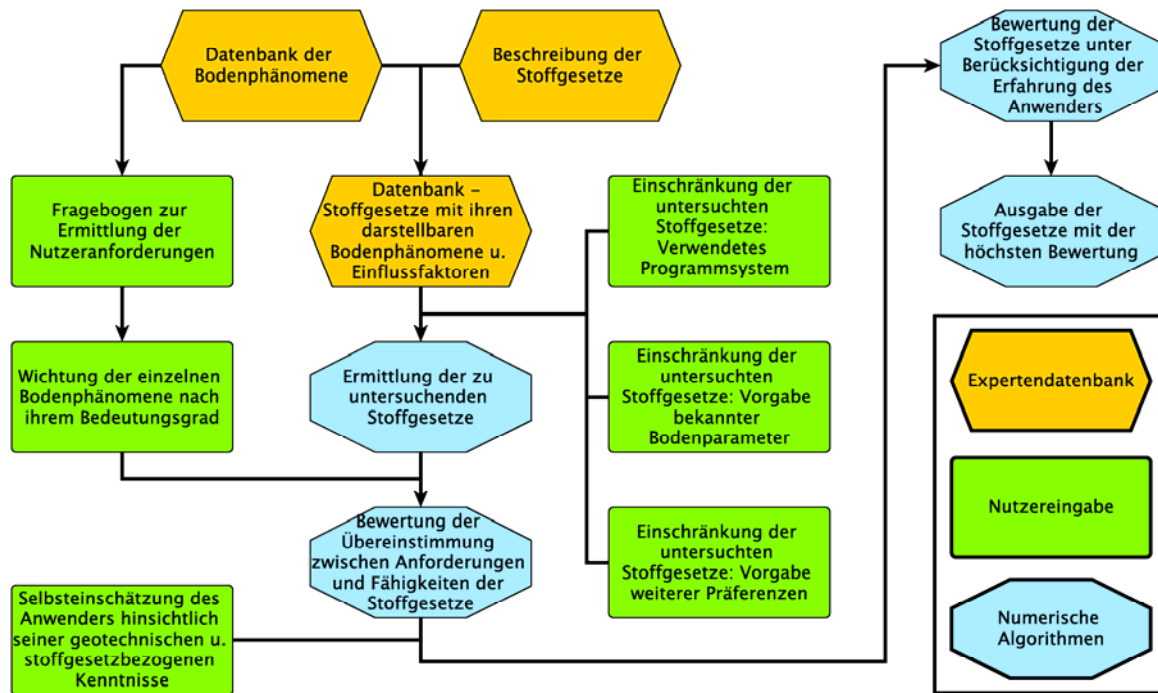


Abbildung 7: Im GeoTechControl-Projekt entwickelte Auswahlprozedur zur Bestimmung der für die aktuellen Problemstellung geeigneten Stoffgesetze

Frage	Antwort
Handelt es sich um einen feinkörnigen Boden ?	+/o/-/?
Kann das Bodenverhalten als drainiert betrachtet werden ?	+/o/-/?
Findet eine Belastungsumkehr während des Bauvorgangs statt (z.B. Baugrubenaushub) ?	+/o/-/?

Tabelle 1: Beispielfragen zur Erfassung der erforderlichen Bodenphänomene

4.1 Fragebogen Bodenphänomene und Eigenschaften

Die zu simulierenden Bodenphänomene werden durch einen Fragebogen ermittelt (siehe Tabelle 1). Der Anwender sollte entsprechende geotechnische Kenntnisse besitzen. Die Antwortmöglichkeiten sind (+) gute bis sehr gute Wiedergabe erforderlich, (o) eine näherungsweise Wiedergabe ist ausreichend, (-) es ist keine

Wiedergabe/Berücksichtigung erforderlich, (?) es ist nicht bekannt, ob eine Berücksichtigung erforderlich ist.

4.2 Wichtung der einzelnen Phänomene

Die Wichtung der Bodenphänomene erfolgt durch Gewichtungsfaktoren, so dass einzelnen Phänomenen eine höhere Bedeutung als anderen zugewiesen werden kann. Beispielwichtungen sind in Tabelle 2 angegeben.

Bodenphänomen	Wichtung
Spannungsabhängige Steifigkeit	1,0
Dehnungsabhängige Steifigkeit	0,6
Verdichtung bei Belastungsumkehr	0,3

Tabelle 2: Wichtung einzelner Phänomene nach ihrem Bedeutungsgrad

4.3 Bewertung des Übereinstimmungsgrades

Der Bewertung der Übereinstimmung zwischen Nutzeranforderung und den in der Stoffgesetzdatenbank gespeicherten Fähigkeiten der einzelnen Materialgesetze wird entsprechend der in Abbildung 8 dargestellte Matrix vorgenommen.

		Datenbank		
		+	-	o
Anforderung	+	1	0	0,5
	-	1	1	1
	o	1	0,25	0,5
	?	1	0	0,6

Abbildung 8: Bewertung des Übereinstimmungsgrades

4.4 Kurzbeispiel

Eine beispielhafte Auswertung für ein fiktives Stoffgesetz A und vier Bodenphänomene wird in Tabelle 4 vorgenommen. Nach Feststellung der Übereinstimmung (Bewertung) zwischen Nutzeranforderung und Fähigkeit des Stoffgesetzes werden diese gewichtet. Die individuelle Ergebnispunktzahl des Stoffgesetzes A

kann z.B. durch Summation über alle Phänomene ($S=1+0,5+0,07+0,7+\dots$) erfolgen. Anschließend werden dem Nutzer die Stoffgesetze mit den höchsten erzielten Punktzahlen zur Verwendung vorgeschlagen.

	...	E-sig	Be-Ent	Verd	Dichte	...
Stoffgesetz A	...	+	O	-	-	...
Nutzereingabe	...	O	+	O	-	...
Bewertung	...	1	0,5	0,25	1	...
Wichtung	...	1	1	0,3	0,7	...
Ergebnis	...	1	0,5	0,07	0,7	...

Tabelle 4: Kurzbeispiel

5 Zusammenfassung

Das Bodenverhalten kann aufgrund seiner Komplexität nur mit fortgeschrittenen Stoffgesetzen realitätsnah wiedergegeben werden. Somit ist die genaue Kenntnis der Fähigkeiten und Einschränkungen einzelner Stoffgesetze von großer Wichtigkeit für eine realitätsnahe Prognose. Die vorgestellte Stoffgesetzklassifikation sowie das Auswahlverfahren erlauben ein Übertragen des stoffgesetzespezifischen Fachwissens in die Baupraxis und sind ein wesentlicher Bestandteil des Geo-TechControl-Systems.

Referenzen

Getec UK (2011): <http://getec-uk.com/services/geotechnical-instrumentation>

Kolybas D., Herle I. (2008): Stoffgesetze für Böden. In.: Grundbautaschenbuch, Band 1, S. 243-288, Ernst & Sohn, Berlin