

# ANALYSE GEOTECHNISCHER PROBLEMSTELLUNGEN MIT FORTSCHRITTLICHEN NUMERISCHEN METHODEN AM BEISPIEL EINER SELBSTREGULIERENDEN MEMBRANGRÜNDUNG

O. Detert

HUESKER Synthetic GmbH, Gescher

K. Kahledi, H. Modaressi, T. Schanz

Ruhr-Universität Bochum, Bochum

**KURZFASSUNG:** Am Beispiel eines innovativen selbstregulierenden interaktiven Gründungssystems wird die systematische Untersuchung des komplexen Systemverhaltens unter Einsatz der Zentrifugen-Modelltechnik und fortschrittlichen numerischen Methoden beschrieben. Es findet eine Diskussion unterschiedlicher Analysemethoden komplexer Systeme statt sowie deren Vor- und Nachteile. Anschließend wird am Beispiel des Gründungssystems eine mögliche Vorgehensweise unter Verwendung von globalen Sensitivitätsanalysen und Metamodellen näher beschrieben.

## 1 EINLEITUNG

Die Analyse des Trag- und Verformungsverhaltens komplexer Gründungssysteme, sowie die Abhängigkeit von verschiedenen Systemparametern kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Es können Untersuchungen an Bauwerken oder kleinmaßstäblichen Laborversuchen bei 1g oder im erhöhten Schwerfeld vorgenommen werden sowie numerische Simulationen des Systems.

Der vorliegende Beitrag diskutiert die unterschiedlichen Untersuchungsmethoden sowie deren Vor- und Nachteile. Am Beispiel einer neuartigen selbstregulierenden und interaktiven Membrangründung wird erläutert, wie die Vorteile verschiedener Methoden miteinander kombiniert werden können, um eine kosten- sowie zeiteffiziente Analyse bezüglich des Trag- und Verformungsverhaltens komplexer Systeme durchzuführen. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Verwendung fortschrittlicher numerischer Methoden.

## 2 ANALYSE METHODEN

### 2.1 Feldmessungen

Über Feldmessungen an realen Bauwerken können die Belastungen des Systems ermittelt und das Trag- sowie Verformungsverhalten analysiert werden. Dem Vorteil, dass auf diese Weise sehr reale Messwerte erhalten werden, stehen die Nachteile der hohen Kosten, des großen Zeitaufwands und der eingeschränkten Reproduzierbarkeit gegenüber. Variationen in der Bodenschichtung oder den Materialparametern können auftreten und das Systemverhalten beeinflussen. Selbst bei sorgfältiger Vorbereitung von Feldversuchen, bei denen unter anderem der Untergrund aufbereitet wird, kommt es zu einer deutlichen Streuung der erzielten Werte, bei den als maßgebend erachteten Parametern.

Um zuverlässige Aussagen über die Wirkungsweisen und Belastungen komplexer Systeme treffen zu können, deren Verhalten zudem von mehreren Parametern und den eintretenden Verformungen abhängen, ist eine große Anzahl von Versuchen beziehungsweise Messungen notwendig.

Die Anzahl an Systemkonfigurationen in Kombination mit unterschiedlichen Belastungssituationen bei Feldversuchen ist aufgrund der zuvor genannten Aspekte, im Besonderen den Kosten und der Zeit, jedoch stark begrenzt. Die Herleitung allgemeingültiger Aussagen für variierende Randbedingungen ist daher über Feldversuche schwer zu erreichen.

### 2.2 Laborversuche

Laborversuche stellen im Vergleich zu Feldversuchen häufig eine sowohl kosten- als auch zeiteffiziente Alternative dar. Die Randbedingungen der Versuche sind kontrollierungsweise steuerbar, wodurch eine gute Reproduzierbarkeit der Versuche gegeben ist. Nachteilig bei Laborversuchen ist häufig der, aus einer reduzierten Größe der Versuchsmodelle resultierende, reduzierte Spannungszustand im Modell. Dies kann bei spannungsabhängigem Materialverhalten zu unbrauchbaren Ergebnissen führen. Das spannungsabhängige Verhalten einiger Systemkomponenten kann über Skalierungsgesetze oder Ersatzmaterialien nachgebildet werden (u.a. Springman et al., 1992; oder Garnier und Gaudin, 2007;). Bei Böden, insbesondere bei feinkörnigen bindigen Böden, sind solche Skalierungen jedoch kaum möglich und die Verwendung von Ersatzmaterialien nur bedingt zielführend (Taylor 1995; Hettler, 2010).

### 2.3 Zentrifugen-Modelltechnik

Der Einsatz der Zentrifugen-Modelltechnik ermöglicht es, den realen Spannungszustand relativ genau nachzubilden, wobei die zuvor genannten Vorteile der Laborversuche erhalten bleiben. Die Nachbildung des realen Spannungszustandes wird erreicht, indem ein um den Maßstabsfaktor  $m$  verkleinertes Modell einem Schwerfeld ausgesetzt wird, welches der  $n$ -fachen Erdbeschleunigung entspricht, wobei  $m=n$  gewählt wird. Das Modell wird hierzu auf einer Kreisbahn bewegt, so dass durch die Zentrifugalbeschleunigung eine statische Beschleunigung in horizontaler Richtung erzeugt wird.

Umfassende Untersuchungen eines komplexen Gründungssystems sind aber auch mit der Zentrifugen-Modelltechnik kosten- und zeitintensiv.

## 2.4 Numerische Simulationen

### 2.4.1 Allgemeines

Die numerischen Methoden bieten hier eine weitere kosten- sowie zeiteffiziente Alternative. Die Analyse komplexer geotechnischer Problemstellungen mit numerischen Methoden zählt zum Stand der Technik. Hierzu wird in einer Software ein numerisches Modell der Problemstellung erzeugt. Unter einem Modell wird die Abbildung eines realen Systems verstanden, welches die maßgeblichen Prozesse beziehungsweise Eigenschaften des realen Systems in ausreichender Genauigkeit für die jeweils untersuchte Problemstellung wiedergibt. Um dies zu überprüfen findet eine Validierung des Modells statt, welche anhand von Mess- oder Erfahrungswerten erfolgt.

Mit dem validierten Modell können nachfolgend numerische Simulationen der Problemstellung durchgeführt werden, bei denen einzelne Parameter oder die Modellgeometrie innerhalb von Parameterstudien variiert werden, um deren Einfluss auf das Systemverhalten zu bestimmen. Die Variation von einzelnen oder mehreren Parametern ist ohne großen Aufwand möglich. Umfangreiche Analysen können durchgeführt werden und Kraft- oder Verformungsgrößen an beliebigen Stellen im System ausgelesen werden.

### 2.4.2 Sensitivitätsanalysen

Neben Parameterstudien können auch Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden. Mittels Sensitivitätsanalysen kann die Abhängigkeit der Systemantworten von den Eingangsparametern, wie Systemgeometrie oder Materialparameter, untersucht werden. Sensitivitätsanalysen können lokal oder global erfolgen. Der Unterschied zwischen den beiden Analysevarianten wird nachfolgend erläutert.

#### 2.4.2.1 Lokale Sensitivitätsanalyse

Bei der lokalen Sensitivitätsanalyse (LSA) wird jeweils der Wert eines einzelnen Parameters innerhalb eines definierten Wertebereichs variiert, während alle weiteren Parameter konstant gehalten werden. Dies kann für verschiedene Parameter wiederholt werden. Diese Vorgehensweise ermöglicht es, zu ermitteln, ob ein Parameter innerhalb der gewählten Grenzen im Vergleich zu den weiteren Parametern einen bedeutenden Einfluss auf das Systemverhalten beziehungsweise auf die Systemantworten besitzt. Da die Anzahl der benötigten Berechnungen für die Analyse je Parameter verhältnismäßig gering ist, sind Ergebnisse beziehungsweise Erkenntnisse recht schnell zu erzielen.

Nachteilig bei der Methode ist, dass eine gegenseitige Beeinflussung der Eingangsparameter nicht berücksichtigt wird, da nur ein Parameter variiert wird, während die übrigen konstant gehalten werden. Die ermittelte Sensitivität ist somit stark abhängig vom gewählten Startpunkt und vernachlässigt ein gegebenenfalls nicht lineares Systemverhalten. Die Gültigkeit der ermittelten Aussage ist somit stark beschränkt.

#### 2.4.2.2 Globale Sensitivitätsanalyse

Die Bedeutung der einzelnen Parameter auf das Systemverhalten unter Berücksichtigung der gegenseitigen Beeinflussung der Parameter untereinander kann mit Hilfe einer globalen Sensitivitätsanalyse (GSA) ermittelt werden. Bei der GSA werden in den numerischen Simulationen mehrere Parameter parallel innerhalb definierter Grenzen variiert. Um zuverlässige Aussagen zu bekommen, ist eine deutlich größere Anzahl von Berechnungen notwendig, als bei der lokalen Sensitivitätsanalyse. Der Aufwand steigt mit zunehmender Anzahl der zu variierenden Parametern über-

proportional an und kann zu extremen Simulationszeiten von mehreren Wochen führen. Der Nachteil dieser Vorgehensweise besteht somit in dem sehr hohen Rechenaufwand. Die Gültigkeit der Aussage erstreckt sich dafür jedoch über den gesamten Untersuchungsbereich für alle möglichen Kombinationen der Eingangsparameter.

### 2.4.3 Metamodell

Mithilfe mathematischer Modelle beziehungsweise Verfahren, wie zum Beispiel der sogenannten Metamodell Technik, kann die erforderliche Berechnungsdauer deutlich reduziert werden. Ein Metamodell ist eine Regressionsfunktion, welche eine Anzahl von Eingangsparametersätzen mit den dazugehörigen Ausgangsparametersätzen verknüpft. Die Qualität beziehungsweise Zuverlässigkeit eines Metamodells ist dabei abhängig von der Anzahl der verfügbaren Datensätze und kann mittels Vergleichsberechnungen zwischen dem erstellten Metamodell und weiteren numerischen Simulationen mit neuen Eingangsparametersätzen überprüft werden.

Ist ein Metamodell mit ausreichender Genauigkeit bestimmt worden, können weitere Variationen der Eingangsparameter berechnet und approximiert werden. Ergebnisse für zum Beispiel eine GSA unter Verwendung des Metamodells erzielt werden ohne die ursprüngliche Software für die numerischen Simulationen zu verwenden (siehe Abbildung 1).

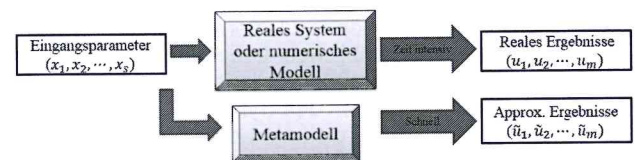


Abbildung 1: Erläuterungsgrafik zum Verdeutlichen der Zusammenhänge zwischen Messwerten am realen System beziehungsweise numerischer Vorwärtssimulationen und der Ermittlung der Ergebnisse unter Nutzung eines Metamodells (Kalehdi, 2012)

### 2.4.4 Samplingverfahren

Um sicherzustellen, dass eine gute Abdeckung möglicher Kombinationen der Eingangsparameter innerhalb der gewählten Grenzen bei der Untersuchung erzielt wird, finden unterschiedliche Samplingverfahren Anwendung bei der Ermittlung der Eingangsparameter, wie zum Beispiel das Latin Hypercube Sampling (LHS) Verfahren (McKay, 1992). Bei dem LHS Verfahren wird die Verteilung der einzelnen Parameter innerhalb des definierten Bereiches in Sektoren eingeteilt, aus den anschließend in geregelter Form zufällig die Parameter gewählt werden. Diese Methode stellt sicher, dass mit einer relativ geringen Anzahl an Berechnungen der gesamte Parameterraum gut abgedeckt wird.

Im Folgenden wird ein neues Gründungssystem, die selbstregulierenden interaktiven Membrangründung, vorgestellt, anhand welches die Anwendung der beschriebenen Versuchstechniken in Verbindung mit den numerischen Verfahren zur Analyse des Systemverhaltens erläutert wird.

### 3 SELBSTREGULIERENDE INTERAKTIVE MEMBRANGRÜNDUNG

Die zuvor beschriebene Analysetechnik soll im Weiteren am Beispiel der selbstregulierenden interaktiven Membrangründung, kurz SIM, erläutert werden.

Die SIM stellt ein innovatives Gründungssystem dar, welches derzeit am Lehrstuhl Grundbau, Boden und Felsmechanik der Ruhr-Universität in Bochum in Kooperation mit der Firma HUESKER Synthetic GmbH untersucht wird.

Der Einsatzbereich der SIM ist die Gründung von Dämmen oder Schüttkörpern auf extrem weichen Untergründen, wo Grund- und Böschungsbrüche sowie unverträglich große Verformungen auftreten können.

Die SIM besteht aus zwei vertikalen und parallelen Wänden, wie zum Beispiel Spundwänden, welche in den Weichboden eingebracht werden und an Geländeoberkante kraftschlüssig über eine geotextile und dehnbare Zugmembran mit vernachlässigbarer Biegesteifigkeit verbunden sind (siehe Abbildung 2).

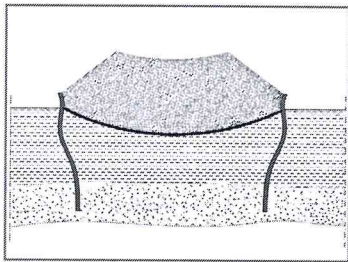


Abbildung 2: Skizze der belasteten und verformten selbstregulierenden Membrangründung

Die vertikalen Wände können innerhalb der Weichschicht enden oder in eine tragfähige Schicht einbinden. Der Damm- oder Schüttkörper wird auf der Zugmembran errichtet. Der Boden unterhalb des Damm- oder Schüttkörpers wird dabei von der Zugmembran und den vertikalen Elementen eingefasst. Darüber hinaus kann das System dazu beitragen, die benötigte Grundfläche für die Gründung von Dammbauwerken zu reduzieren, indem die Spundwände über die Geländeoberkante geführt werden.

Die Last aus dem Damm- oder Schüttkörper wird teilweise von der Zugmembran in die vertikalen Elemente abgeleitet und zum Teil vom Weichboden unterhalb der Zugmembran getragen. Die Last auf dem Weichboden führt zu einem Anstieg der vertikalen Spannungen und somit auch zu einem Anstieg der horizontalen Spannungen innerhalb des Weichbodens unterhalb des Damm- beziehungsweise Schüttkörpers. Aufgrund der erhöhten horizontalen Spannungen werden die Spundwände auseinander gedrückt. Hieraus resultiert eine Dehnung der Zugmembran und somit eine Aktivierung von Zugkräften. Ebenso entstehen Zugkräfte in der Membran aufgrund der sich einstellenden Verformungen der Dammaufstandsfläche. Diese Zugkräfte wirken der auswärtsgerichteten Verformungen entgegen und halten beziehungsweise ziehen die Spundwände zurück.

Steigt die Last auf das Gründungssystem an, so erhöhen sich die auf die Spundwände wirkenden horizontalen Kräfte und damit die auswärtsgerichteten Verformungen. Gleichzeitig steigen aber auch die Zugkräfte in der Membran an und wirken der Verformung entgegen, wo durch sich eine Selbstregulierung des Systems ergibt.

Das System sichert somit die Standsicherheit des Dammkörpers, ermöglicht es die seitlichen Verformungen des Bauwerkes zu kontrollieren und reduziert die horizontalen Spannungen im Weichboden außerhalb. Die letzten

beiden Punkte sind vor allem von Bedeutung, wenn empfindliche Nachbarbebauung vorhanden ist.

Im folgenden Abschnitt wird die Durchführung der Systemanalyse mit zuvor beschriebenen Techniken erläutert.

### 4 SYSTEMANALYSE

#### 4.1 Allgemeines

Mit Hilfe der Metamodell-Technik und globalen Sensitivitätsanalyse soll ermittelt werden, welche Systemparameter für die Verschiebung der vertikalen Wände auf Höhe des Anschluss der dehnbaren und zugfesten Membran bedeutend sind, um die Anwendung der fortschrittlichen numerischen Methoden zu verdeutlichen.

#### 4.2 Validierung des numerischen Modells

Die Überprüfung, ob mittels eines (numerischen) Modells die maßgeblichen Ergebnisse von beispielsweise physikalischen Versuchen mit ausreichender Genauigkeit wiedergegeben werden können, wird als Validierung bezeichnet (Babuska und Oden, 2004).

Die Validierung des numerischen Modells der SIM erfolgt anhand von Messungen aus durchgeführten Zentrifugen-Modellversuchen (Detert et al., 2012). Liegt eine ausreichende Übereinstimmung der Mess- und Simulationsergebnisse vor, kann das numerische Modell für weitere Analysen verwendet werden.

#### 4.3 Globale Sensitivitätsanalyse (GSA)

Bevor mit der GSA begonnen wird, findet eine Auswahl an Systemparametern statt, von denen ein bedeutender Einfluss auf die untersuchten Systemantworten zu erwarten ist. Tabelle 1 zeigt eine Auflistung der für diese Vorgänge als bedeutend eingeschätzten Parameter, sowie deren Untersuchungsbereich.

Tabelle 1: Parameterauswahl sowie deren Untersuchungsbereich

	Eingangswert	Einheit	untere Grenze	obere Grenze
<b>Weichboden</b>				
	Eoed	kN/m <sup>2</sup>	3.000	10.000
	$\varphi$	°	18	24
	c	kN/m <sup>2</sup>	3	9
<b>Schüttmaterial</b>				
	Eoed	kN/m <sup>2</sup>	40.000	100.000
	$\varphi$	°	31	39
<b>Modellwand</b>				
	EI	kN/m <sup>2</sup>	30.000	170.000
<b>Zugmembran</b>				
	J	kN/m	25.000	60.000
<b>Dammgeometrie</b>				
	belasteter Spundwandüberstand	m	0	3
	Dammhöhe	m	0	10

Aufgrund der hohen Anzahl an Parametern sind eine große Anzahl an Berechnungen notwendig, um verlässliche Aussagen treffen zu können.

Um diese äußerst zeitintensiven Simulationen zu beschleunigen, wird ein Metamodell basierend auf ca. 120 numerischen Vorwärtsrechnungen erstellt. Die Eingangsparameter für die Berechnungen werden mit dem zuvor erläuterten Samplingverfahren, dem Latin Hypercube Sampling Verfahren, ermittelt. Bevor mit dem Metamodell weitere Simulationen durchgeführt werden, wird zunächst die Genauigkeit der approximierten Ergebnisse des Metamodells mit den numerischen Ergebnissen für jeweils 20 Parameterpaare überprüft. Ist diese ausreichend groß erfolgen die weiteren Berechnungen mit dem Metamodell.

In Abbildung 3 ist dies für die Wandverschiebung am Anschlusspunkt der Zugmembran nach der Schüttung und vor der Konsolidierung aufgetragen. Auf der x-Achse sind die Ergebnisse der numerischen Vorwärtsrechnung aufgetragen und auf der y-Achse die Ergebnisse des Metamodells. Bei einer 100% Übereinstimmung zwischen dem Originalmodell und dem Metamodell lägen alle Punkte auf der gestrichelten Linie. Bei der hier abgebildeten Übereinstimmung ergibt sich ein Bestimmtheitsmaß  $R^2$  von 0,984. Das erstellte Metamodell kann somit die eintretende Wandverformung nach der Schüttung sehr gut wiedergeben.

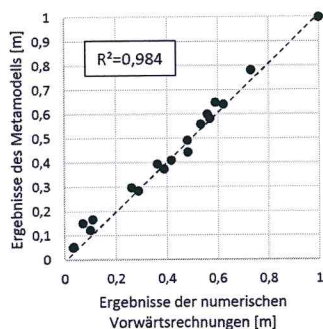


Abbildung 3: Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den numerischen Vorwärtsrechnungen und den Ergebnissen welche aus dem Metamodell für die Wandverformung am Anschlusspunkt der Zugmembran direkt nach der Schüttung und vor der Konsolidierung.

Als Vergleich seien hier die Berechnungsdauern der numerischen Vorwärtsrechnungen mit der Berechnungssoftware und dem Metamodell genannt: Die mittlere Berechnungsdauer einer Systemkonfiguration mit der numerischen Berechnungssoftware liegt bei 18 Stunden. Die Berechnungsdauer mit dem Metamodell auf dem gleichen Computer für eine Systemkonfiguration liegt unterhalb einer Sekunde.

In Abbildung 4 ist die Auswertung der globalen Sensitivitäten unter Verwendung des Metamodells in Bezug auf die Wandverschiebung auf Höhe des Membrananschlusses zu sehen. Die Auswertung ergibt, dass die Höhe des Dammes und somit die Belastung auf das System der dominierenden Eingangsparameter ist. Einen signifikanten Einfluss hat zudem die Dehnsteifigkeit der Zugmembran, wohin gegen die Biegesteifigkeit der Spundwand keinen besonderen Einfluss auf die Verschiebung der Wand am Anschlusspunkt besitzt. Der Einfluss des Überstandes ist nur leicht höher als der allgemeine Einfluss der übrigen Parameter.

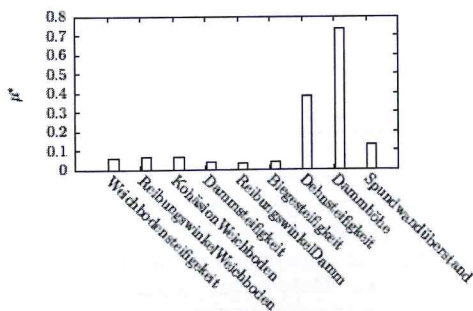


Abbildung 4: Bedeutung der einzelnen Parameter bezüglich der Wandverformung am Anschlusspunkt der dehnsteifen Zugmembran

In Abbildung 5 sind die ermittelten Verformungsfiguren (Zentrifugen-Modellmaßstab) für vier unterschiedliche Kombinationen bezüglich der Dehnsteifigkeit der Membran und der Biegesteifigkeit der Spundwand zusehen. Der An-

schluss der Membran befindet sich auf der Höhe von 0,22 m. Es ist zu erkennen, dass die Dehnsteifigkeit der Membran für die Verschiebung der Wand auf Höhe des Anschlusses der dominierenden Parameter ist, während die Biegesteifigkeit der Modellwand die Verformungsfigur zwischen der Einspannung am Wandfuß und Anschlusspunkt der dehnsteifen Membran beeinflusst.

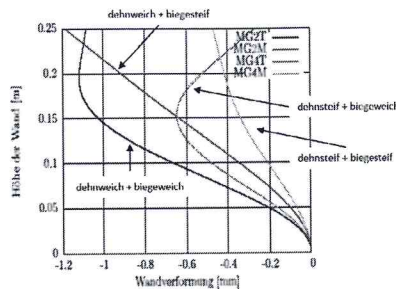


Abbildung 5: Vergleich der eintretenden Wandverformung für die vier möglichen Kombinationen aus dehnweicher und dehnsteifer Zugmembran und biegeweicher und biegesteifer Spundwand. Der Anschlusspunkt der Zugmembran befindet sich auf der Höhe von 0,22 m (Zentrifugen-Modellmaßstab).

## 5 ZUSAMMENFASSUNG

Am Beispiel der innovativen selbstregulierenden interaktiven Membrangründung (kurz: SIM) für Damm- und Schüttkörper auf extremen Weichböden wurde die Anwendung von fortschrittlichen numerischen Methoden zur Analyse komplexer Systeme demonstriert. Die Durchführung von globalen Sensitivitätsanalysen unter Verwendung von Metamodellen hilft, die das Systemverhalten oder Teilbereiche des Systems maßgeblich dominierenden Parameter zu ermitteln. Die Kenntnis dieser so ermittelten Parameter hilft bei der weiteren Analyse sowie Dimensionierung der Systeme. Darüber hinaus wird deutlich, welche Parameter aufgrund ihres Einflusses auf das Systemverhalten bei der Dimensionierung mit großer Sorgfalt bestimmt werden müssen.

## 6 LITERATUR

- Babuska, I. & Oden, T., 2004. Verification and validation in computational engineering and science: basic concepts", Computer methods in applied mechanics and engineering
- Detert, O., König, D. & Schanz, T. 2012. Centrifuge modeling of an adaptive foundation system for embankments on soft soils. In Bezuijen, A (Editor), 2nd Eurofuge conference, Delft, Netherlands
- Garnier, J. & Gaudi, C., 2007. Physical modelling in geotechnics – catalogue of scaling laws and similitude questions in centrifuge modelling, Technical report, ISSMGE TC2
- Hettler, A., 2010. Possibilities and limitation of 1-g model-technique, in "7<sup>th</sup> International Conference on Physical Modelling in Geotechnics"
- Khaledi, K., 2012. Methods of Model Approximation for Mechanized Tunnel Simulation, Master thesis, Ruhr Universität Bochum, Chair of foundation engineering rock and soil mechanics
- McKay, D., 1992. Latin Hypercube Sampling as a tool in uncertainty analysis of computer models, Proceeding of 1992 Winter Simulation Conference, ed. Swain, J., Goldsman, D., Crain, C. & Wilson, J.
- Springman, S., Bolton, M., Sharma, J. & Balachandra, S., 1992. Modelling and instrumentation of a geotextile in the geotechnical centrifuge, in "Earth Reinforcement Practice"
- Taylor, R., 1995. Geotechnical Centrifuge Technology. Blackie Academic & Professional