

## Realisiert mit Dlubal Software...

### Denkmalschutz mit Dlubal-Software in Angkor, Kambodscha

Viele der Steinmonumente in der archäologischen Ausgrabungsstätte Angkor, Weltkulturerbe der UNESCO, sind heute verfallene Ruinen. Auch der Zustand der intakten Denkmäler verschlechtert sich rasch.

Ein internationales Expertenteam beschäftigt sich mit den Ursachen für die bautechnisch schlechte Verfassung der Monumente und versucht geeignete Lösungen für deren Rettung zu finden. Auch eine tschechische Forschungsgruppe beteiligt sich an den Maßnahmen und hat das fünfjährige Forschungsvorhaben "Thermografie und Statik bei Sandsteinmonumenten in Angkor" ins Leben gerufen.

Hauptziel ist die Untersuchung von Steinstrukturen hinsichtlich der Einwirkungen aus umweltbedingten Temperaturänderungen und deren Einfluss auf die Standicherheit. Neben der Forschungsarbeit vor Ort in Angkor umfasst das Projekt numerische Simulationen zum Tragverhalten der Steinbauten, die durch äußere Belastung v.a. Temperatureinwirkungen beansprucht werden. Das Dlubal-Programm RFEM wurde zur Erstellung numerischer Modelle und für Tragwerksanalysen verwendet.

Die Steinbauwerke wurden zwischen dem 9. und 15. Jh. erbaut und sind heute meist mehr oder weniger verfallene Ruinen. Der Großteil besteht aus Steinblöcken, die zwar ohne Bindemittel zusammengebaut wurden, jedoch hier und da feuerfeste Ziegel aufweisen. Bei den bis heute erhaltenen Tempeln ist eine stetige Bruchentwicklung festzustellen, hauptsächlich als Zerfall der Steinmauern infolge vieler verschiedener Faktoren.

Zusätzlich zu einer aus heutiger Sicht ungeeigneten Baumethode, stellen schwierige klimatische Verhältnisse die Hauptursache für den Verfall dar.

Beobachtungen von Verformungen und Temperaturen bei ausgewählten Tempeln zeigten, dass die Differenz zwischen höchster und niedrigster



Tempel Angkor Wat in Kambodscha

Temperatur an vereinzelt Außenflächen im Laufe eines Jahres mehr als 60°C beträgt. Außerdem liegen große Wärmeunterschiede zwischen Tag und Nacht vor. Oft war die Temperatur an Innenflächen etwa 40°C geringer als an Außenflächen. Dies führt zu einer ungleichmäßigen Belastung und großen Wärmedehnungen innerhalb der Steinbauten. Infolgedessen und aufgrund weiterer Faktoren dehnen sich die Blockverbindungen aus und einzelne Steine fallen heraus. Schließlich zerfällt der Tempel in Einzelteile und bricht zusammen.

Numerische Simulationen zum Tragverhalten erfolgen im FEM-Programm RFEM, mit dem ein hoher Übereinstimmungsgrad der Eigenschaften realer Steintempelstrukturen mit denen eines numerischen Modells erreicht werden kann. Das Ziel der Analyse besteht darin, weitere Entwicklungen der technischen Bedingungen auf Grundlage der Simulationsergebnisse vorherzusagen. Die gewonnen Erkenntnisse können anderen Forschungsprojekten dienen, darunter die Aufstellung optimaler Schutzmaßnahmen zur Stabilisierung der Steinanlagen.

Bisher wurden 3D-Modelle typischer Struktursegmente, u.a. eine Einzelwand, eine tetragonale Pyramide, ein überdachter Säulengang sowie diverse Turmformen, erstellt und in RFEM getestet. Die numerischen Modelle wurden mit Volumenelementen abgebildet, die die einzelnen Steinblöcke darstellen. Die gegenseitige Wechselwirkung der Blöcke wurde durch Kontaktelemente simuliert, um somit Zugwirkungen quer zur Verbindung beseitigen und unterschiedliche Reibungsintensität zwischen den Blockkontakten berücksichtigen zu können.

Eine Reihe an Simulationen wurde für Temperaturlasteinwirkungen un-

ter Berücksichtigung charakteristischer Baugrundeigenschaften und verschiedener Anschlussformen von Steinblöcken durchgeführt. Die numerischen Analyseergebnisse zeigen eine deutliche Übereinstimmung mit dem Tragverhalten der Steinstruktur (Verformungen, Versagen etc.). Die Forschung hat bewiesen, dass die Temperaturlast bedeutende Werte aufweist und einen beträchtlichen Einfluss auf den Tempelzustand ausübt, der sich immer mehr verschlechtert. Die Forschungserkenntnisse werden weiterentwickelt, so dass die Auswirkung von Temperaturänderungen auf das Tragverhalten der Steindenkmäler genauer erfasst und optimale Maßnahmen eingeleitet werden können, um die Monumente für nachfolgende Generationen zu bewahren.

### Tschechisches Forschungsteam in Angkor:

Projektmanager:

Dr. Karel Kranda

Academy of Sciences of the Czech Republic

Institut für Kernphysik

Leiter des Forschungsteams:

Doc. Ing. Jan Pašek, Ph.D.

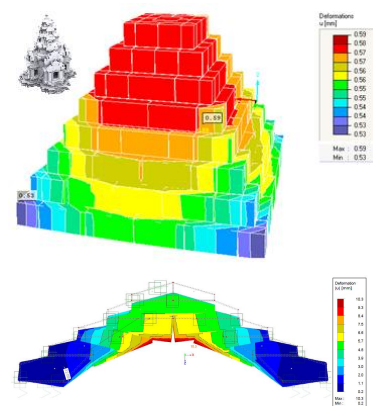
Fakultät für Bauwesen der CTU (Czech Technical University) in Prag  
Abteilung für Gebäudestrukturen

Teammitglieder:

Ing. Jiří Svoboda

Ing. Hansley Pravin Gaya

Otakar Veverka



Analyseergebnisse in RFEM

### Software

Ing.-Software Dlubal GmbH

[www.dlubal.de](http://www.dlubal.de)