

# Deformationsmessungen an einer unterirdischen Staumauer in der Region Gunung Kidul, Indonesien

Norbert Rösch, Martin Vetter und Günter Schmitt

Geodätisches Institut, Karlsruher Institut für Technologie

E-Mail: Norbert.Roesch@kit.edu, Martin.Vetter@kit.edu, Guenter.Schmitt@kit.edu

## Zusammenfassung

Der vorliegende Aufsatz fasst die Ergebnisse der geodätischen Deformationsmessungen zweier vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekte zusammen. In vier vollständig gemessenen Epochen wurde die Geometrie einer Karsthöhle in Mitteljava mittels geodätischer Verfahren überprüft. Zeitlich erstreckten sich die Messungen über neun Jahre mit einem maximalen Abstand zwischen zwei Epochen von vier Jahren. Die untersuchte Höhle war auf einer Seite durch eine Betonmauer zu einem unterirdischen Staudamm ausgebaut. Ziel des Anbaus ist die Brauchwassergewinnung für die ortsansässige Bevölkerung, die in der Vergangenheit während der Trockenzeit unter erheblichem Wassermangel litt. Die angestaute Wassermenge beträgt ca. 0,5 Mio. cbm bei einer durchschnittlichen Wassersäule von etwa 12 bis 15 Metern. Nach Starkregenereignissen stieg die Wassersäule in der Vergangenheit sogar auf 35 m an. Trotz des enormen Wasserdrucks konnte mit den eingesetzten Werkzeugen über die Jahre hinweg keine signifikante Änderung der Geometrie festgestellt werden. Die Höhle erweist sich bislang, z. T. entgegen den Befürchtungen einiger Sachverständigen, als sehr stabil. Dies konnte durch unabhängige Messungen mit Messdrähten, die parallel während zweier Epochen durchgeführt wurden, bestätigt werden.

## 1 Einleitung

Etwa 22 Mio. qkm der Erdoberfläche bestehen aus Karstgebieten. Der Boden in diesen Gebieten kann kaum Wasser speichern, weil die Niederschläge wegen der zahlreichen Klüfte sofort abfließen. In solchen Gegenden, in denen nur periodisch Niederschläge fallen, führt das zu einer unmittelbaren Austrocknung der landwirtschaftlich nutzbaren Fläche während der Trockenzeit. Die Region Gunung Kidul in Zentraljava, Indonesien, über die in diesem Beitrag berichtet wird, gehört zu den Gebieten auf die die genannten Charakteristika zutreffen.

Die Trockenperiode mit den sehr eingeschränkten Möglichkeiten der Bewirtschaftung der Ackerflächen hat dramatische Folgen für die dort lebenden Bau-

ern. Dies führte in der Vergangenheit zu verstärkten Abwanderungen aus diesem Gebiet. Um diesen Trend aufzuhalten haben die Behörden vor Ort ein Projekt ins Leben gerufen, das bislang weltweit einzigartig ist. Gefördert vom BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) haben Ingenieure des KIT (Karlsruher Institut für Technologie) einen unterirdischen Fluss gestaut, um mit dem in der Regenzeit zurückgehaltenen Wasser die ansässige Bevölkerung in der Trockenzeit zu versorgen. Auf diese Weise sollten die Lebensverhältnisse verbessert und die Abwanderung aufgehalten werden.

Wie die einleitenden Worte schon vermuten lassen, beinhaltet ein Projekt dieses Ausmaßes nicht nur rein technische Aspekte sondern auch weitreichende sozio-



ökonomische Gesichtspunkte. Als Folge davon sind an diesem Projekt neben Ingenieuren auch weitere Wissenschaftler der unterschiedlichsten Disziplinen beteiligt. Die Aufgabenstellung umfasst neben der reinen Konstruktion der Anlage auch die Analyse der Wasserqualität in der Umgebung bis hin zur Schulung der ortsansässigen Bevölkerung, um deren Bewusstsein, insbesondere was die Abwässer anbelangt, zu sensibilisieren. Im Folgenden werden diese Gesichtspunkte allerdings nicht weiter berücksichtigt. Vielmehr wird zunächst die Anlage als Ganzes vorgestellt, um danach unmittelbar den Zusammenhang mit der Überwachungsmessung herzustellen.

Abbildung 1.1 gibt einen Überblick über die gesamte Anlage und zeigt die Staumauer mit der dahinter liegenden Maschinenplattform, wo die Turbinen und Pumpen zu finden sind. Von der Maschinenplattform aus - sie befindet sich etwa 100 m unter der Erdoberfläche - wird das angestaute Wasser zur Oberfläche gepumpt, wobei sogenannte Kreiselpumpen im Pumpen- und Turbinenbetrieb zum Einsatz kommen. Das genannte Prinzip nennt sich *Pumpes as Turbines (PAT)* (siehe dazu Abb. 1.2; weitere techn. Details sind in Störzer 2009 zu finden) und hat zur Folge, dass der Wirkungsgrad im Vergleich zum getrennten Betrieb von Pumpen und Turbinen zwar etwas geringer ist, die Anlage dafür aber sehr wartungsarm ist.

Im unterirdischen Stauraum können etwa 0,5 Mio. cbm Wasser zurückgehalten werden. Die Anlage ist dafür ausgelegt, im Bedarfsfall etwa 80 000 Menschen mit jeweils 70 l Wasser pro Tag zu versorgen. Um dies leisten zu können musste auch das entsprechende Verteilernetz auf- bzw. ausgebaut werden. Diese Arbeiten sind noch nicht endgültig abgeschlossen.

Die Planung sieht einen Anstau des Wassers von etwa 11 bis 15 m vor. Ein Starkregenereignis im März 2012 hat allerdings dazu geführt, dass kurzzeitig eine Stauhöhe von über 30 m gemessen wurde. Durch bauliche Änderungen an der Mauer, die für einen besseren Abfluss des Wassers sorgen, sollen derartige Extremsituationen zukünftig vermieden werden.

Schon zur Lokalisierung des Standorts der Maschinenplattform waren umfangreiche geodätische Messungen notwendig, auf die in diesem Zusammenhang nicht weiter eingegangen werden soll. Der interessierte Leser sei dazu auf eine frühere Veröffentlichung (siehe Benner u. a. 2009) verwiesen, wo diese Problematik

im Detail vorgestellt wird. Dieser Beitrag soll demgegenüber einzig die Überwachung der Mauer und deren Umgebung - also die Maschinenplattform - zum Gegenstand haben.

Bevor im nächsten Abschnitt die vorbereitenden Arbeiten zur Messung vorgestellt werden, ist es notwendig, noch kurz etwas über die im Beitrag verwendete Bezeichnungsweise zu sagen. Einige Leser werden die hier vorgestellten Arbeiten in der Höhle mit Konvergenzmessungen in Verbindung bringen, da sich durch die Ähnlichkeit der Umgebungen eine derartige Betrachtung aufdrängt. Weil aber der Begriff Konvergenzmessung im engeren Sinne nur im Zusammenhang mit Berg- oder Tunnelbauprojekten und den damit verbundenen Verformungen des umgebenden Gesteins bei der Auffahrung gebraucht wird, verzichten die Autoren in diesem Kontext auf diesen Begriff. Statt dessen wird im Folgenden die allgemeinere Bezeichnung *Deformationsmessung* verwendet, da die mögliche Verformung der Höhle vor allem im Zusammenhang mit dem steigenden Wasserspiegel gesehen wird. Der zu untersuchende Effekt ist damit nicht die Konsequenz einer Auffahrung (eine in Bezug auf die Konvergenz andere Sichtweise wird beispielsweise in Preis und Wasmaier 2012 vertreten).

## 2 Vorbereitende Arbeiten und Ausrüstung

Als Vorbereitung zur eigentlichen Messung wurden Voruntersuchungen im Messkeller des Geodätisches Instituts Karlsruhe (GIK) durchgeführt. Dies erschien aus mehreren Gründen notwendig. Zum einen wurde das für den Einsatz vorgesehene Gerät (es handelte sich um einen Tachymeter des Typs *Leica TCRA 1201*) noch nicht unter den teilweise extremen Bedingungen, die in der Höhle herrschen - 100% Luftfeuchtigkeit bei 26° Celsius -, getestet. Zum anderen galt es zu ermitteln, welche Genauigkeit im Modus *automated* unter der gegebenen Messanordnung mit z. T. kurzen Zielweiten und ungleichmäßiger Ausleuchtung der Zielmarken zu erreichen ist.

Die Entscheidung, mit automatischer Zielerkennung zu messen war wesentlich von den zum Messzeitpunkt herrschenden Bedingungen beeinflusst. Denn es war von vornherein klar, dass im laufenden Baustellenbetrieb gemessen werden musste. Die Beobachtun-



Abbildung 1.1: Übersicht (Quelle: [Nestmann u. a. 2009])

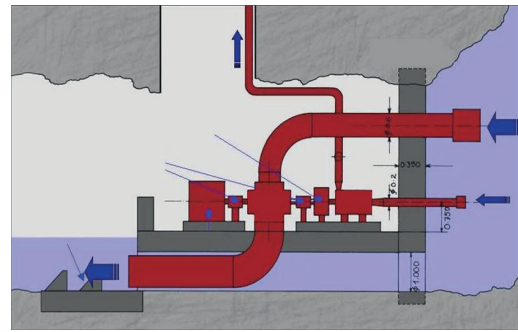


Abbildung 1.2: Die Pumpen/Turbinen (Quelle: [Oberle u. a. 2009])

gen mussten damit schnell erfolgen und die Instrumentenstandpunkte mussten von Fall zu Fall, dem Baufortschritt entsprechend, ausgewählt werden. Abbildung 2.1 gibt einen Eindruck von der Enge, die zum Zeitpunkt der Messung auf der Maschinenplattform herrschte.

In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass die verschiedenen Messepochen nicht alle mit automatischer Zielerkennung durchgeführt wurden. Die erste Epoche wurde vollständig mit visueller Einstellung durchgeführt. Zum Einsatz kam dabei ein Gerät der Fa. Leica (TCR 1205). Es galt daher zu ermitteln, ob unter den gegebenen Rahmenbedingungen die gleichen Genauigkeiten erreicht werden konnten. Denn diese sollten nicht schlechter sein als die vorangegangenen. Das Ergebnis der Testmessungen war mehr als zufriedenstellend. Die erreichten Genauigkeiten lagen nach der Ausgleichung mit weniger als 1 mm sogar noch unter den Angaben des Herstellers und in der gleichen Größenordnung wie die der vorangegangenen Epochen.

Bei der Durchführung der Messung wurde auch in der Vergangenheit auf eine Vermarkung der Standpunkte verzichtet. Die verschiedenen Standpunkte in den unterschiedlichen Epochen sind zwar ähnlich – dies ergab sich fast zwingend durch die Bedingungen vor Ort –, aber eben nicht identisch. Die Beobachtungen wurden folgerichtig nach dem Prinzip der freien Stationierung durchgeführt, wobei auf jedem neuen Standpunkt auf die Beobachtung einer genügend großen Anzahl von bekannten Punkten zu achten war. Diese Bedingung war wegen der zahlreichen Sichthindernisse keinesfalls ohne größeren Aufwand einzuhalten.

Es wurde darüber hinaus auch nicht mit Zwangszentrierung gearbeitet, obwohl das ursprünglich ins Auge gefasst wurde. Dadurch entfielen zwar Überbestim-

mungen, aber die Arbeit vor Ort zeigte letztlich, dass unter den herrschenden Bedingungen die Messung mit mehreren Stativen nicht möglich gewesen wäre. Zum einen fehlte der dazu notwendige Platz und zum anderen wurde parallel zu den Vermessungsarbeiten gearbeitet, so dass die Zentrierung der Stative nicht sichergestellt gewesen wäre. In diesem Zusammenhang sei nochmals auf Abbildung 2.1 verwiesen.



Abbildung 2.1: Die Maschinenplattform während der Bauarbeiten

Im Übrigen wäre die Vermarkung fester Standpunkte auch deshalb nicht sinnvoll gewesen, weil sich die Situation auf der Maschinenplattform beispielsweise durch den Einbau neuer Rohre – bauliche Änderungen werden auch heute noch vorgenommen – ständig verändert. Damit wären u. U. Beobachtungen aufgrund von nachträglich hinzugekommenen Sichthindernissen nicht mehr möglich gewesen und damit ein ursprünglich aufgestellter Beobachtungsplan obsolet.

Damit die Messungen und die daraus abgeleiteten Ergebnisse möglichst homogen bleiben, wurde immer mit den gleichen Zielmarken gearbeitet. Ein Beispiel ist in Abbildung 2.2 gegeben. Die Zielmarken werden auf eingemauerte Konvergenzbolzen geklemmt, so dass Sie immer den gleichen Punkt repräsentieren.



Abbildung 2.2: Die Zielmarken

### 3 Messung und Auswertung

Bevor auf die Einzelheiten der Messung eingegangen wird, soll noch kurz das eigentliche Ziel der Beobachtungen erläutert werden. Die erste Beobachtung der vermarkten Punkte (siehe Abbildung 3.1) wurde noch vor dem Einstau durchgeführt. Damit wurde zum einen zunächst der Istzustand dokumentiert. Zum anderen war man darüber hinaus bestrebt, eine unabhängige Bestätigung der Messungen, die zeitgleich mit Konvergenzmessdrähten durchgeführt wurden, zu erhalten. Die Messungen mit den Konvergenzmessdrähten bezogen sich dabei zwar auf die gleichen Bolzen, da aber andere Befestigungen verwendet wurden, hatten die ermittelten Strecken einen anderen Bezugspunkt. Die aus den Messungen abgeleiteten Streckenänderungen sollten aber in erster Näherung übereinstimmen. An dieser Stelle sei das Ergebnis dieses Vergleichs vorweggenommen. In den beiden Messepochen, für die Ergebnisse aus beiden Verfahren vorlagen, stimmte die Differenz zwischen den in jeweils zwei miteinander verglichenen Epochen – im Rahmen der Messgenauigkeit – der Richtung und dem Betrage nach überein.

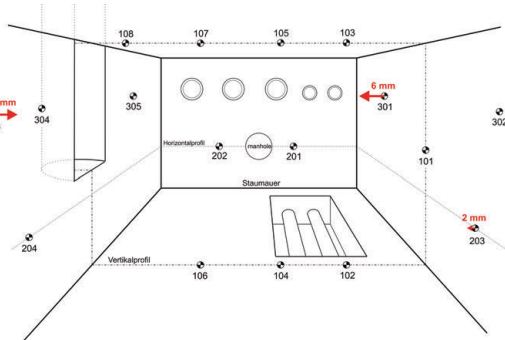


Abbildung 3.1: Die Anordnung der Zielmarken

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt die Motivation zur Durchführung der Arbeiten dargestellt wurde,

soll im folgenden auf die Messungen mit dem Tachymeter eingegangen werden. In Abbildung 3.2 ist dazu beispielhaft ein Instrumentenstandpunkt dargestellt. Die Anordnung der Punkte ist in Abbildung 3.1 wiedergegeben. Die insgesamt 17 Messpunkte verteilen sich auf vier an der Decke, jeweils vier an jeder der Seitenwände, die der Mauer benachbart sind sowie drei auf der Bodenplatte und zwei an der Staumauer selbst. An der Mauer, die der Staumauer gegenüber liegt, befindet sich kein Objektpunkt. An den genannten Stellen sind Halterungen eingemauert, auf die die Zielmarken aufgeschraubt werden können.



Abbildung 3.2: Aufnahmezeitpunkt mit Instrument (Leica TCRA 1201)

Wie bereits weiter oben beschrieben wurden die Standpunkte so gewählt, dass auf einem Punkt möglichst viele Punkte angemessen werden konnten. Eine Vermarkung dieser Punkte fand aus den im Abschnitt 2 genannten Gründen nicht statt. Die beiden Abbildungen 3.3 sowie 3.4 geben die Situation für die beiden Epochen 2009 und 2012 wieder. In den Abbildungen sind einerseits die jeweils fünf Standpunkte ebenso wie die Zielpunkte und die Beobachtungen zu erkennen. Darüber hinaus sind auch die Ergebnisse der Ausgleichung in Form der Fehlerellipsen zu erkennen.

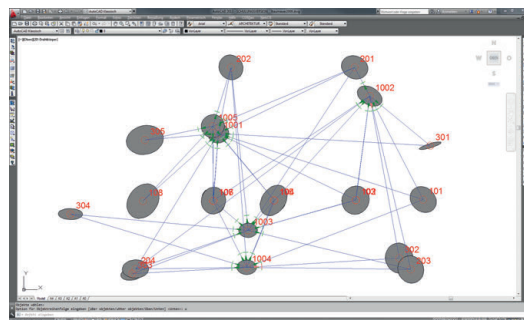


Abbildung 3.3: Epoche 2009: Fehlerellipsen der Punkte

Bemerkenswert sind zunächst die Standpunkte, deren Lage sich zwischen den zwei Epochen stark verändert

hat. Dies ist im Wesentlichen den baulichen Veränderungen geschuldet, die sich zwischen den beiden Zeitpunkten ergeben haben. Dadurch wurden Sichten verbaut und es mussten neue, geeignete Standpunkte gesucht werden.

Tabelle 3.1: Mittlerer Punktfehler nach der Ausgleichung (Lage)

Epoche	Jahr	mittl. Fehler	Red.
0	2008	1,93 mm	64
1	2009	0,77 mm	35
2	2012	0,68 mm	49
3	2013	1,25 mm	81
4	2017	0,72 mm	55

Im Folgenden soll kurz auf die Auswertung der Ergebnisse eingegangen werden. Insgesamt wurden fünf zeitlich aufeinander folgende Epochen beobachtet. Die erste Messung wurde 2008 durchgeführt, die nächsten 2009, 2012, 2013 und die letzte 2017. Alle Beobachtungen wurden mit Geräten der Firma Leica durchgeführt. Die beiden ersten Epochen wurden mit einem TCR1205 beobachtet, die folgenden mit einem TCRA 1201.

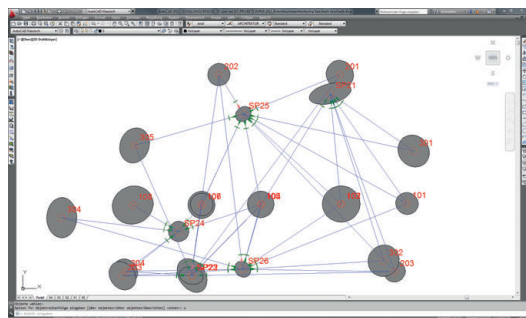


Abbildung 3.4: Epoche 2012: Fehlerellipsen der Punkte

Auf jedem Standpunkt wurden alle Messelemente zu allen Punkten, die angezielt werden konnten, erfasst. D. h., es wurden sämtliche Strecken, Richtungen und Zenitdistanzen registriert. Die genannten Messelemente wurden getrennt nach Lage und Höhe als freies Netz ausgeglichen. Für die Standpunkte wurde dabei aus den Beobachtungen zu den Objektpunkten nach dem Prinzip *Freie Stationierung* geeignete Näherungskordinaten berechnet.

Tabelle 3.2: Mittlerer Punktfehler nach der Ausgleichung (Höhe)

Epoche	Jahr	mittl. Fehler	Red.
0	2008	6,34 mm	23
1	2009	0,79 mm	26
2	2012	1,43 mm	20
4	2017	0,40 mm	28

Die Tabellen 3.1 und 3.2 geben – getrennt nach Lage und Höhe – die Ergebnisse der Ausgleichung wieder. Bemerkenswert ist dabei die Tatsache, dass sich die mittleren Fehler ebenso wie die Redundanzen z. T. erheblich unterscheiden. Ursächlich dafür sind die großen Unterschiede in den jeweiligen Bedingungen vor Ort. Einige Messungen mussten unter starkem Zeitdruck in den Arbeitspausen durchgeführt werden, andere während des laufenden Betriebes der Anlage und damit unter dem Einfluss der starken Schwingungen, die die Turbinen/Pumpen auf die Umgebung ausüben. Der erste Effekt führte dazu, dass keinesfalls immer die optimalen Konfigurationen – mit der Konsequenz einer verminderten Redundanz – erzielt werden konnten. Die Schwingungen des laufenden Betriebs der Anlage sowie der damit verbundene Lärm, der selbst mit Gehörschutz kaum zu ertragen war, wirkten sich nachteilig auf das Instrument und die Psyche der Beobachter aus.

Abbildung 3.5 zeigt am direkten Vergleich zwischen den beiden Epochen 0 und 1 die Unterschiede der Koordinaten der Referenzpunkte im Rechts- und Hochwert ebenso wie in der Höhe. Von den 17 Punkten bewegen sich die Differenzen der ausgeglichenen Koordinaten bei 14 im Band zwischen  $\pm 1\text{ mm}$ . Die betragsmäßig größte Abweichung beläuft sich auf knapp  $3\text{ mm}$ . Dabei ist hervorzuheben, dass gerade die Epoche 0 diejenige mit dem höchsten mittleren Fehler nach der Ausgleichung ist. Die maximale Differenz in der aus den ausgeglichenen Koordinaten abgeleiteten Strecken beläuft sich betragsmäßig auf  $1,3\text{ mm}$ .

## 4 Zusammenfassung

Die Deformationsmessungen haben bislang keine relativen Verschiebungen der Maschinenplattform erkennen lassen. Der Betrieb der Anlage kann damit als bislang unproblematisch gesehen werden. Mit der

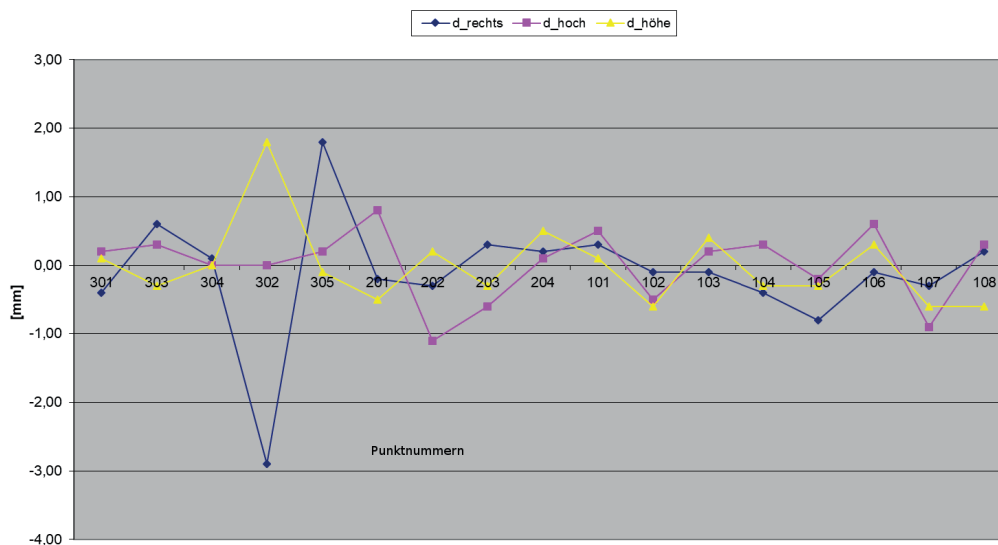


Abbildung 3.5: Direkter Vergleich zweier Epochen

offiziellen Übergabe der Anlage an den Betreiber vor Ort im Jahre 2014 wurde auch eine Handlungsempfehlung gegeben, die die regelmäßige Kontrolle der inneren Geometrie der Maschinenplattform vorsieht. Es wurde ein jährlicher Überprüfungszyklus vorgeschlagen. Dies erschien notwendig, vor allem angesichts der Tatsache, dass es sich bei der Anlage um einen weltweit einzigartigen Prototypen handelt und somit keine langfristigen Erfahrungen vorliegen.

Aus geodätischer Sicht sind die Messungen zum Monitoring der Anlage als sehr erfolgreich zu bezeichnen. Es konnte durch mehrere Messepochen nachgewiesen werden, dass sich auch unter widrigen Umständen sehr gute Ergebnisse erzielen lassen. Sowohl die Messung auf Basis der freien Stationierung als auch die Auswertestrategie haben sich bestens bewährt. Die Messergeb-

nisse waren in allen Fällen besser als die jeweiligen Beteiligten unter den gegebenen Umständen erwartet hätten.

## Literatur

- Benner, M., Schmitt, G. und Vetter, M. (2009): Der geodätische Beitrag zur Karsthöhlenbewirtschaftung. *Wasserwirtschaft* 2009.
- Nestmann, F., Oberle, P., Muhammad, I., Tobias, L. und Schloz, U. (2009): Bewirtschaftung unterirdischer Fließgewässer in Karstgebieten – Pilotstudie auf Java, Indonesien. *Wasserwirtschaft* 2009.
- Oberle, P., Muhammad, I., Nestmann, F., Fritz, J. und Ravisunder, T. (2009): Bewirtschaftung unterirdischer Fließgewässer in Karstgebieten – Pilotstudie auf Java, Indonesien. *Wasserwirtschaft* 2009.
- Preis, S. und Wasmaier, P. (2012): Konvergenzmessung - ein permanentes, automatisches Überwachungssystem zur Untersuchung von Gebäudebewegungen. *DVW Bayern e. V.* 2012.
- Störzer, G. (2009): Einsatz von Pumpen als Turbinen (PAT) im Falleitungsbetrieb des Zweckverbands Landeswasserversorgung. *Wasserwirtschaft* 2009.