

# Vermessungsarbeiten in einem Wasserbewirtschaftungsprojekt unterirdischer Fließgewässer in Indonesien

Stephan Kupferer, Günter Schmitt, Martin Vetter und Jan Zimmermann

## Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt den geodätischen Anteil an einem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekt zur Wasserbewirtschaftung unterirdischer Fließgewässer in einer indonesischen Karstregion. Neben fachübergreifenden Aspekten des Gesamtprojekts werden Details der Vermessungsarbeiten und der Datenweiterverarbeitung angesprochen. Dies sind die Grundlagenvermessung zur Bohr- und Baustelleneinrichtung, die Überwachung der Vertikalität der Schachtbohrung, die Detailvermessung des Höhlenverlaufs und die Darstellung der Höhle in einem 3D-Modell als Grundlage für weitere Anwendungen wie Navigation, Simulation, Spezialberechnungen (z.B. Profile, Volumina) etc. Die Arbeit schließt mit einem Ausblick auf ein mögliches Folgeprojekt zum Wasserressourcenmanagement in der Region.

## Summary

*The publication describes the geodetic part of a joint project concerning the water resources management of an underground river in a Javanese karst area, funded by the BMBF. In addition to the interdisciplinary aspects of the general project, details of the surveying work and the data processing are dealt with. The topics are the basic surveying for the installation of the drilling and the construction site, the control measurements for the vertical drilling of the shaft, the surveying of the cave geometry in detail and the presentation of the cave within a three dimensional model as a basis for further applications such as navigation, simulation, special calculations (for example profiles, volumes) etc. The paper ends with an outlook to a new project under application concerning a comprehensive water resources management in the whole region.*

## 1 Projektübersicht

### 1.1 Hintergrund

Der Distrikt Gunung Kidul der Yogyakarta Special Province gilt als eines der ärmsten Gebiete Javas und ganz Indonesiens. Eine der wesentlichen Ursachen hierfür liegt im eklatanten Wassermangel während der mehrmonatigen Trockenperiode. Auf dem zerklüfteten Karstuntergrund ist der landwirtschaftliche Ertrag gering und auch die Trinkwasserversorgung stark beeinträchtigt. Als Konsequenz der geringen Lebensqualität wandern die aktivsten Personen aus, die regionale Entwicklung stagniert.

Die Karstlandschaft an der Südküste Javas ist von hundertern miteinander vernetzter Höhlen durchzogen, in de-

nen sich die schnell in den Karstaquifer versickernden Niederschläge sammeln. Das Wasser dieser unterirdischen Flüsse tritt fast vollständig erst wieder in Quellen an der Küste zutage.

Um die Lebensbedingungen der Bevölkerung zu verbessern und gleichzeitig die aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht nicht verantwortbare Förderung des Wassers mittels über Dieselgeneratoren versorgter Pumpsysteme einzustellen, wird die pilothafte Realisierung eines unterirdischen Bewirtschaftungsspeichers bei Wonosari, Yogyakarta, unter Nutzung nachhaltiger Technologien und regenerativer Energien angestrebt. Geplant ist der partielle Einstau des Fließgewässersystems durch ein Sperrbauwerk mit integrierter Kleinwasserkraftanlage (Abb. 1). Die



Abb. 1: Schematischer Schnitt durch Höhle und Sperrbauwerk

Höhle »Gua Bribin« stellte sich nach einer vom BMBF geförderten Machbarkeitsstudie (Nestmann und Oberle 2002) als für dieses Pilotprojekt besonders geeignet heraus, da ein potentielles Speichervolumen von ca. 400.000 m<sup>3</sup> bei einem Durchfluss von mehr als 2000 l/s auch während der Trockenzeit und eine mögliche Einstauhöhe von etwa 15 m gegeben sind.

### 1.2 Verbundstruktur und Partner

Das vom BMBF unter dem Namen »Erschließung und Bewirtschaftung unterirdischer Karstfließgewässer, Yogyakarta Special Province, Indonesien« von 2003 bis 2005 geförderte Verbundprojekt soll die Zielvorgaben unter der Bedingung vor Ort angepasster Technologien (appropriate technologies) realisieren. Die hierzu notwendige interdisziplinäre Zusammenarbeit umfasst die Bereiche

Wasserbau und Wasserwirtschaft, Geodäsie, Geochemie, Baustofftechnologie und Ingenieur-Holzbau, alle aus der Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften der Universität Karlsruhe (TH), sowie den Bereich Soziologie, Universität Gießen. Partner aus dem Bereich der Industrie sind die Firmen Herrenknecht AG, Schwanau, mit dem Teilprojekt »Vertikalvortriebsmaschinen für Karstgestein«, KSB, Frankental, »Angepasste Turbinentechnologie« und Walcher Wasserkraft »Steuer- und Regelungstechnik«.

Die wesentlichen Partner auf indonesischer Seite sind die Regierung der Yogyakarta Special Province, verschiedene Ministerien und behördliche Einrichtungen, staatliche und private Universitäten in Yogyakarta, Bandung und Jakarta und der lokale Höhlenforscherclub. Der zentrale Industriepartner ist die Firma Wijaya Karya, Jakarta, die für die gesamten Baumaßnahmen über- und unterirdisch verantwortlich ist. Weitergehende Informationen sind Nestmann und Oberle (2006) sowie dem Internet unter BMBF-Verbundprojekt: <http://www.hoehlenbewirtschaftung.de> zu entnehmen.

## 2 Geodätisches Teilprojekt

### 2.1 Zielsetzung

Die Notwendigkeit eines geodätischen Teilprojektes ergab sich zwangsläufig aus der Aufgabenstellung des Gesamtprojektes heraus. Für mehrere Teilprojekte mussten die geometrischen Grundlagen durch geodätische Arbeiten geschaffen werden.

Das wichtigste Ziel im Rahmen des Projektes war die Absteckung der Bohrstelle, von der aus ein Schacht von 2,5 m Durchmesser von der Oberfläche bis zur knapp 100 m tiefer liegenden Höhle gebohrt wurde. Die Genauigkeit der Absteckung sollte bei 20cm liegen, da der Schacht den Rand der Höhle nur streift. Diese Randlage des Schachtes bietet einen bequemen Zugang zur Höhle, ohne die inzwischen begonnenen und weitere, geplante Baumaßnahmen zu behindern.

Die Höhle ist als Laborhöhle konzipiert, in der verschiedene Varianten der Energie- und Wassergewinnung erprobt oder simuliert werden sollen. Da im Karst die Dichtigkeit der Höhle als sehr kri-

tisch gilt, wurde außer der Errichtung eines unterirdischen Sperrwerkes zur Energiegewinnung auch der Einbau einer Holzdruckrohrleitung erwogen. Als weitere Alternative stand auch die Energiegewinnung über mehrere Staukaskaden zur Diskussion. Alle diese Varianten erfordern umfangreiche Planungen, für deren Grundlage eine komplette dreidimensionale geodätische Aufnahme der Höhle mit hinreichender Genauigkeit notwendig ist.

Als Ergebnis dieser Aufnahme wurde ein dreidimensionales Modell der Höhle erstellt, das einen virtuellen Flug durch den Schacht und die komplette Höhle hindurch bis zum Eingangsstollen ermöglicht.

### 2.2 Konzeption

Am Geodätischen Institut Karlsruhe (GIK) liefen schon im Vorfeld verschiedene Tests, um die Messverfahren auszuwählen, mit denen die geforderte Genauigkeit möglichst rationell erreicht werden kann. Dabei galt es auch, die Zuverlässigkeit zu analysieren, um grobe Fehler in den Messungen sicher aufdecken zu können.

Verfahren wie Bussolenmessungen oder Kreiselmessungen schieden wegen einer zu geringen Genauigkeit oder einer zu langen Messdauer aus. Da die Höhle begehbar ist und auch größtenteils auf Stativen gearbeitet werden kann, wurden Planungsberechnungen für einen Polygonzug durchgeführt (Abb. 2). Der Zug erstreckte sich in der Planung auf einer Länge von ca. 3 km über rund 65 Standpunkte mit einer kürzesten Zielweite von ca. 3,5 m. Analysen mit dem Softwarepaket NETZ2D des Geodätischen Instituts (Oppen und Jäger 1991) ergaben, dass unter Verwendung eines Tachymeters mit 2 mm Streckenmessgenauigkeit, 0,6 mgon Richtungsgenauigkeit und 0,5 mm Zentriergenauigkeit der Zug zweimal unabhängig gemessen werden muss, um die Vorgaben zu erfüllen. Für die Arbeiten wurde ein am Institut vorhandener Tachymeter vom Typ Leica TCR 1102 ausgewählt.

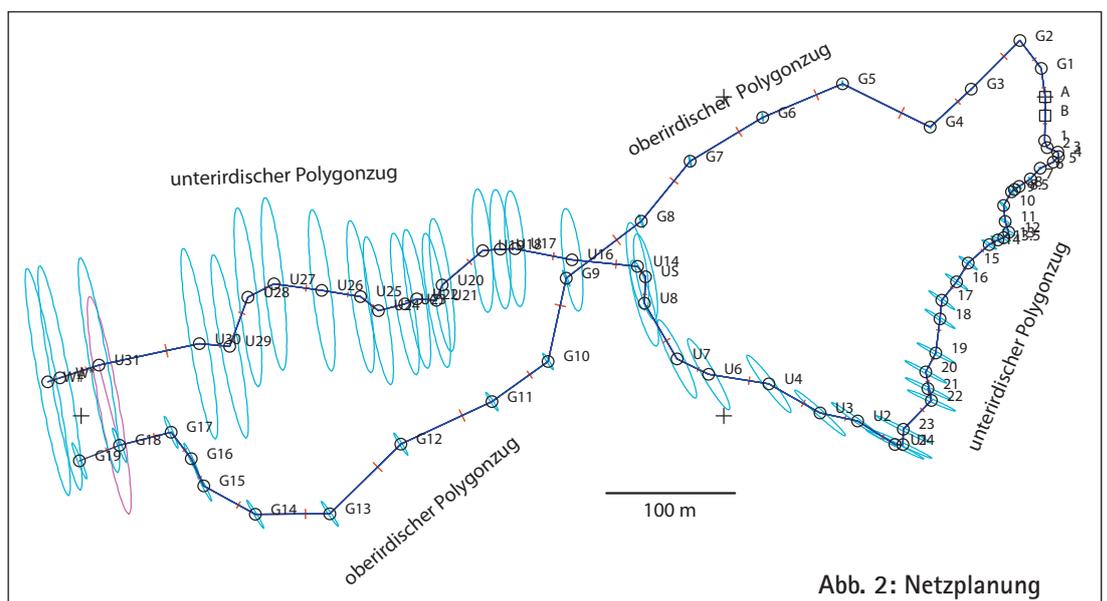


Abb. 2: Netzplanung

## 2.3 Weitere Arbeiten

Die weiteren Arbeiten ergaben sich teilweise erst im Verlauf des Projekts.

Die genaue Lage der Höhle in ihrem kompletten Verlauf wurde in die vorhandenen topographischen Karten übertragen. Die notwendigen Messungen wurden mit Handheld GPS-Empfängern durchgeführt. Dabei wurden die Geographischen Koordinaten des Höhlenanfangs und der Bohrstelle sowie von verschiedenen markanten Punkten wie Straßenkreuzungen ermittelt, die als Passpunkte dienen.

Die Firma Herrenknecht entwickelte im Rahmen des Projekts eine neue Vertikalbohrmaschine. Da für diese Maschine noch keine ausgereifte Steuerungstechnik vorhanden war, wurde am Geodätischen Institut eine einfache und preiswerte Methode entwickelt, mit der gewährleistet werden konnte, die Maschine über eine Tiefe von 100 m mit der notwendigen Genauigkeit vertikal zu fahren.

## 3 Detailvermessung der Höhle

### 3.1 Aufgabe

Der Hauptteil der Kampagne 2003 bezog sich auf die dreidimensionale Vermessung der Höhle als Grundlage für ein später zu erstellendes, räumliches Modell. Die Höhle besteht aus einem 1,7 km langen Hauptgang mit Flusslauf (Flusshöhle) und einem 300 m langen Zugang, der den Hauptgang mit der Erdoberfläche verbindet (Abb. 3). Der Hauptgang ist an beiden Enden durch einen Siphon abgeschlossen. Im Hauptgang befindet sich auf Höhe des Zugangs ein älteres Stauwerk der indonesischen Versorgungsbehörden. Der zu modellierende Bereich der Höhle beginnt entsprechend der bauplanerischen Vorgaben beim bestehenden Stauwerk und folgt dem Flussver-



Abb. 3: Verlauf der Höhle Gua Bribin

lauf über eine Distanz von 1 km bis kurz vor das untere Höhlenende. Hier staut sich der Fluss zu einem See von ca. 400 m Länge. Höhlentaucher haben festgestellt, dass sich dieser See nach dem Siphon über weitere 600 m erstreckt.

Im Verlauf vergangener Expeditionen wurde bereits ein geeigneter Standort für das geplante Bauwerk erkundet.

In diesem Bereich wurden sieben Querprofile aufgenommen. Außerdem sind einige Kernbohrungen zur geologischen Untersuchung vorgenommen worden. Die Profile und die Lage der Kernbohrungen waren in das Höhlenmodell zu integrieren.

Des Weiteren waren die unterirdischen Querprofile auf die Erdoberfläche zu übertragen. Anschließend sollte in diesem Bereich ein besonders geeigneter Platz für eine Schachtbohrung gesucht und markiert werden.

Außerdem mussten im weiteren Umfeld geeignete Festpunkte für die kommende Baustelle eingerichtet werden.

### 3.2 Durchführung

Für die Detailaufnahme in der Höhle waren geeignete Aufnahmepunkte zu schaffen. Die meisten Standpunkte konnten mit Dübelmarken im Gestein festgelegt werden.



Abb. 4: Konsolenmessung im Seebereich

Für die Seebereiche in der Mitte und am Ende der Höhle wurden sieben speziell angefertigte Konsolen mit den Höhlenwänden verschraubt (Abb. 4).

Zur Koordinierung der Aufnahmepunkte wurden von Festpunkten im Eingangsbereich der Höhle aus zwei tote Polygonzüge unabhängig voneinander beobachtet, um die Messungen kontrollieren und die Zuverlässigkeit steigern zu können.

Zur Beleuchtung des Nahbereichs wurden Karbid-Helmlampen verwendet. Da jedoch deren Reichweite begrenzt ist, kamen zur Signalisierung von Zielpunkten während der Polygonierung auch wasserdichte Halogen-Taschenlampen aus dem Tauchsport zum Einsatz.

Für den Bereich der geplanten Baustelle konnten nun vorläufige Koordinaten berechnet und der Zug oberirdisch in diese Richtung fortgesetzt werden. Wie im unterirdischen Teil wurden zwei unabhängige Messungen durchgeführt und anschließend mit der Institutssoftware ausgeglichen.

Die Detailaufnahme in der Höhle erfolgte im reflektorlosen Modus des TCR 1102. Aufgrund der schwierigen Sichtverhältnisse war es dabei für den Beobachter oft

unmöglich, die Form der Höhle im Einzelnen zu beurteilen. Deshalb übernahm diese Aufgabe ein Helfer direkt im Zielbereich, der mit einer eng fokussierten Halogenlampe die aufzunehmenden Objektpunkte markierte.

### 3.3 Besonderheiten

Die Luftfeuchtigkeit von gemessenen 100% bei einer Temperatur von 26° erschwerten die Messungen in der Höhle deutlich. Das dadurch verursachte starke Schwitzen zog einen hohen Frischwasserbedarf nach sich, der täglich in die Höhle geschleppt werden musste. Außerdem beschlug laufend die Optik des Instrumentes, was ein zügiges Arbeiten verhinderte. Hier empfiehlt sich sehr der Einsatz eines Laserabloters statt eines optischen Lots zum Aufstellen der Stative.

Problematisch waren auch zahlreiche Standpunkte, wo es wegen des schlammigen Untergrundes sehr schwierig war, mit Stativen zu arbeiten. Bei den Punkten am See wiederum musste entweder im Wasser stehend oder vom Schlauchboot aus gemessen werden.

Bei der Detailaufnahme in der Höhle behinderten Manganablagerungen auf den Wänden die Messungen. Manganablagerungen sind ein tiefschwarzes Material, das den Laserimpuls so stark abschwächen kann, dass keine Distanzmessung mehr möglich ist. Nach Aussage von Leica kann dieses Problem in zukünftigen Kampagnen durch Verwendung des R300-Moduls der neuen 1200er-Serie gelöst werden.

Die schwierigen äußeren Bedingungen, insbesondere der sehr feine Schlamm, zogen einen hohen Materialverschleiß nach sich. Die Mechanik der DreifüÙe blockierte gegen Ende der Kampagne, so dass sich das Gerät und die Reflektoren nur noch mit Hilfe eines Schweizer Messers abnehmen lieÙen. Auch tägliche, intensive Reinigung konnte diesen Umstand nicht verhindern. Des Weiteren korrodierten die Funkgeräte durch die hohe Luftfeuchtigkeit relativ schnell und waren in kurzer Zeit unbrauchbar. Bereits zu Beginn der unterirdischen Messungen war das TCR 1102 plötzlich zwar einschalt-, aber nicht mehr messbereit. Dieser Defekt konnte nur vom Leica-Service im 500km entfernten Jakarta sehr schnell (innerhalb eines Tages) und kompetent behoben werden.

### 3.4 Ergebnisse

Insgesamt wurden 12 oberirdische und 66 unterirdische Polygonpunkte bestimmt. Ein besonders wichtiges Ergebnis der Polygonierung im Hinblick auf die geplante Bohrung ist die relative Genauigkeit zwischen dem unterirdischen Ende des Zuges und dem oberirdisch abgesteckten Bohrpunkt am Ende des Zuges auf der Oberfläche (Abb. 5). Aus den Berechnungen mit Netz2D ergab sich eine relative Helmertsche Fehlerellipse mit den Halb-

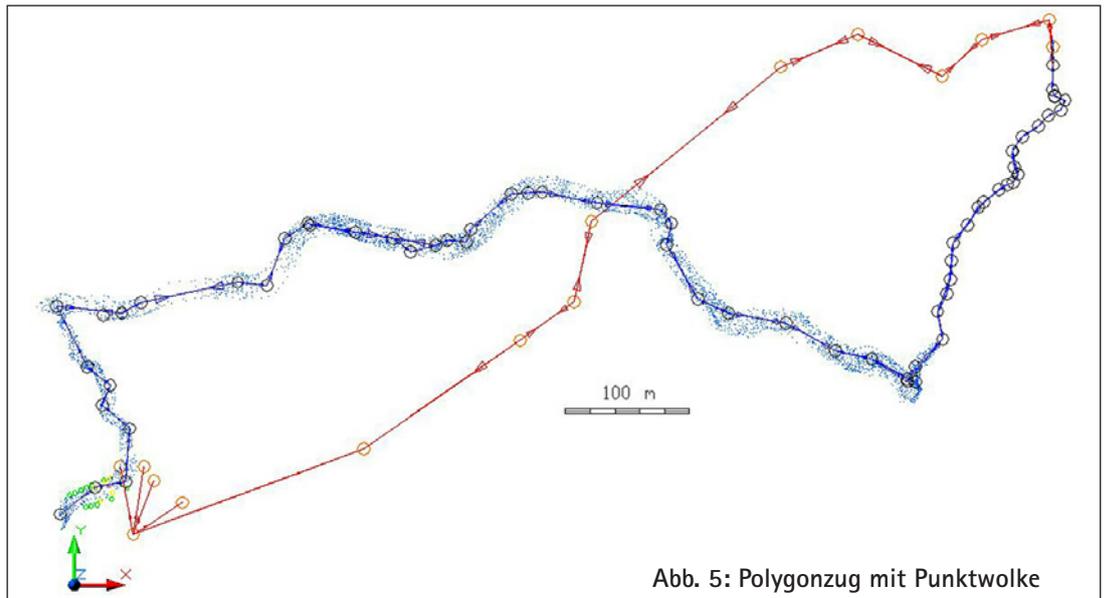


Abb. 5: Polygonzug mit Punktwolke

achsen 19,5 und 1,6 cm in Quer- und Längsrichtung. Das bedeutet, dass die Bohrstelle so abgesteckt werden kann, dass sie mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 40% weniger als 20cm vom unterirdisch festgelegten Durchbruchpunkt entfernt liegt.

Zur Modellierung der Höhle wurden insgesamt 5500 Punkte aufgenommen. Zum Vergleich: Diese Punktmenge entspricht mehr als 500 Querprofilen auf einer Höhlenlänge von 1km, wenn man von etwa zehn Punkten pro Querprofil ausgeht.

## 4 Bautechnische Vermessung

### 4.1 Polygonierung und Schachtabsteckung

Nach Auswahl der Versuchshöhle und ersten Erkundungen samt Probemessungen war sehr schnell klar, dass zur Bauausführung, zum Materialtransport und zur Wartung der späteren Anlagen ein Schacht zur Oberfläche am Ende der Höhle unumgänglich ist. Daher bestand die Aufgabe an die Vermessung zunächst darin, den für diesen Schacht ausgewählten Bereich der Höhle an der Oberfläche abzustecken und gleichzeitig die Höhle dreidimensional zu erfassen. In einer vierwöchigen Kampagne wurde ein Polygonzug in die Höhle gemessen, verbun-

den mit einer gleichzeitigen kompletten Aufnahme. Ein weiterer Zug wurde an der Oberfläche vom Höhleneingang zur geplanten Schachtbohrstelle angelegt, inklusive eines kleinen Netzes im Bereich der späteren Baustelle. Von diesen Punkten aus konnte dann der Höhlenverlauf an der Oberfläche markiert und die Bohrtiefe prognostiziert werden.

Anschließend wurde der zukünftige Baustellenbereich, der in unwegsamem Gelände lag, von den indonesischen Behörden durch eine Straße erschlossen und die



Abb. 6: Vertikalschachtbohrmaschine »VSM 2500«

Baustelle inmitten der Karsthügel-landschaft eingerichtet. Währenddessen fiel von Seiten der Projektkoordinierung die Entscheidung zur exakten Position des Bohrschachtes: das Zentrum sollte 0,5 m außerhalb der Höhle in einem der Profile liegen und bei einem Radius von 1,25 m lediglich 0,75 m Überschneit mit der Höhle aufweisen. Diese Position wurde vom GIK auf der Baustelle

## 4.2 Schachtbohrung

abgesteckt, um daraufhin den Startschacht für die Vertikalschachtbohrmaschine »VSM 2500« der Firma Herrenknecht AG (Abb. 6) betonieren und alle notwendigen Installationen vornehmen zu können.

Da die Bohrung eines vertikalen Schachtes auch für die Firma Herrenknecht AG Neuland bedeutete, lagen dort keinerlei Erfahrungen zur Steuerung der Maschine während des Vortriebes vor. Daher wurde zu diesem Zweck, immer unter der Prämisse der angepassten Technologien, am GIK ein Konzept entwickelt, das sowohl einfach zu handhaben als auch möglichst kostengünstig sein sollte. Nach eingehenden Untersuchungen entschieden sich die Autoren, Laserabloter der Firma Leica, die zum Zentrieren von Dreifüßen konzipiert sind, als Lotgeräte zu verwenden und auf der Maschine rasterförmige Zieltafeln anzubringen (Abb. 7). Zusätzlich stand dem Maschinenfahrer beim Bedienen der Hydraulikzylinder zum Absenken der 13 m hohen Bohrmaschine eine große Dosenlibelle zur Verfügung (Abb. 8).

Um alle horizontalen Bewegungen der Maschine beobachten zu können, wurden zwei Laserlote und zwei zugehörige Zieltafeln benötigt. Die Lote waren am Schachtkopf auf einem Stahlträger, der mit Schwerlastankern im Fundament verschraubt wurde, angebracht, nachdem die Maschine vollständig im Untergrund versenkt war. Dies geschah am Schachtrand, um Kollisionen mit dem per Kran beförderten Material zu vermeiden. Tachymetrisch eingemessen wurden die Lote mit Hilfe der nahe gelegenen



Abb. 7: Zieltafel



Abb. 8: Dosenlibelle

Sicherungspunkte im Bereich der Baustelle. Brisant hierbei war, dass die Laser solcher Lote für Entfernungen von ca. 3 m ausgelegt sind, nun aber für Lotungen von bis zu 50 m und mehr dienen sollten. Dies erforderte einerseits äußerste Sorgfalt beim Horizontieren der Lote mit deren Röhrenlibellen, andererseits exakte und sachverständige Bestimmung des Lotfußpunktes. Bei solchen Entfernungen von etwa 50 m weitet sich der Laserpunkt zu einem linsenförmigen Gebilde von ca. 6 cm Größe auf, welches auf Grund der baubedingten Abweichung aus der Vertikalen bei Drehung des Lotes einen Kreis um den tatsächlichen Lotfußpunkt beschreibt, dessen Zentrum zu ermitteln ist. Da die gesamte Schachttiefe knapp 100 m beträgt, mussten außerdem die Lote nach der Hälfte der zu bohrenden Strecke nach unten versetzt werden, wo sie auf Konsolen, die an die mit Stahl-tübbingen ausgebaute Schachtwand geschweißt waren, eingewiesen wurden. Dieses sehr einfache und kostengünstige System hat sich während der fünfmonatigen Schachtbohrung außerordentlich bewährt. Die Abweichung beim Durchschlag zur Startposition an der Oberfläche betrug lediglich 1,4 und 7 cm. Die Messungenauigkeit der Polygonzüge und der Absteckung konnte nach der Schachtbohrung auch ermittelt werden, indem eine Lotung über die kompletten 100 m vorgenommen wurde. Dabei wurden sowohl das Lot am Schachtkopf am Ende des oberirdischen Polygonzuges und der Lotfußpunkt mit den Koordinaten des unterirdischen Polygonzuges eingemessen. Die Differenz der beiden Messungen betrug jeweils lediglich 2,1 cm in beiden Koordinatenrichtungen. Das bedeutet, die beiden toten Polygonzüge mit ihren knapp 80 Punkten und einer Länge von 3 km weisen in ihrer Zusammenführung eine Abweichung von weniger als 3 cm auf! Dieses Ergebnis übertraf alle Erwartungen.

### 4.3 Achsabsteckung und Deformationsnetz

Nach Fertigstellung und Ausbau des Schachtes konnten die Arbeiten für das geplante Sperrwerk beginnen. Da an der ausgewählten Stelle der Höhlenfluss einen See bildet, bevor er durch einen Siphon in eine weitere Höhle verschwindet, hieß es zunächst Absperrdämme zu errichten und den Arbeitsbereich trockenenzulegen. Diese Dämme sind bereits als Teil des späteren Bauwerks konzipiert. Zudem galt es, noch einige andere Bauwerkachsen für die Ausbruch- und Betonierarbeiten zu signalisieren. Aus diesem Grunde wurden zuerst alle Achsen aus der Planung auf die Höhlenwand übertragen und auf einer festgelegten Höhe mit Schrauben markiert. Darauf folgend begannen die Arbeiten zur Errichtung des Sperrwerks, angefangen mit dem Einbau einer Hochwasserentlastung und der Trockenlegung bis hin zu den Ausbruch-, Felssicherungs- und Betonierarbeiten. Diese Unternehmungen dauern nach wie vor an und sollen 2006 abgeschlossen werden.

Eine weitere Aufgabenstellung ergab sich auf Grund des Entschlusses, eine Bauwerksüberwachung einzurichten. Somit war ein Netz von Vermessungspunkten unterhalb des Sperrwerks erforderlich, die als Stabilpunkte für Deformationsmessungen dienen können. Da Vermarkungen im Boden der Höhle im Bereich des Sees nicht möglich sind und auch in den trockeneren Abschnitten oberhalb die Beschaffenheit des Untergrundes keine ausreichende Stabilität gewährleistete, musste ein anderes Konzept verfolgt werden. Wandkonsolen, wie sie bei der Polygonzugmessung und den Absteckarbeiten verwendet wurden, kamen ebenfalls nicht in Betracht. Sie sind in der Langzeitstabilität fragwürdig und außerdem von der Höhe des Wasserstandes abhängig, so dass keine permanente Verwendung gewährleistet ist. Daher entschied man sich für Schraubvermarkungen in der Höhlendecke. Zusätzlich musste bei der Vermarkungsart berücksichtigt werden, dass noch nicht absehbar war, von welchen Orten aus später Überwachungsmessungen erfolgen müssen, so dass eine Ausrichtung der Vermarkungen auf bestimmte Positionen in der Höhle nicht sinnvoll war. Die Wahl fiel auf Kugeln aus Teflon mit einem Durchmesser von 25 mm, die mit Stockschrauben in der Decke angebracht wurden, um eine freie Standpunktwahl möglich zu machen. Vorherige Untersuchungen ergaben eine Wiederholgenauigkeit der Einmessungen von besser als 1 mm bei einer Bestimmung durch manuelle Tachymetrie und reflektorloser Distanzmessung mit dem TCR 1102. Dabei war allerdings eine materialbedingte Additionskonstante zu berücksichtigen, die nicht dem Kugelradius entspricht. Dies ist auch anschaulich, da der Laser etwas in das Material einzudringen scheint.

Mit diesen Kugelvermarkungen wurden acht Festpunkte angebracht und mit einem mittleren Punktfehler von 1 mm von den bestehenden Konsolen aus reflektorlos eingemessen. Da sich der Wasserspiegel gegenüber den Polygonzugmessungen geändert hatte, musste der

Beobachter die Messungen von einem Schlauchboot aus durchführen. Die Voraussetzungen für Überwachungsmessungen sind damit vorhanden.

## 5 Erstellung des 3D-Modells

Die Aufnahme der Höhle erfolgte dreidimensional und mit reflektorloser Distanzmessung. Dabei wurde eine Punktwolke mit ca. 5500 Punkten erzeugt. Diese ist prinzipiell vergleichbar mit dem Ergebnis einer 3D-Laserscanner-Messung mit dem Unterschied, dass die Abstände zwischen den gemessenen Punkten nicht wenige cm betragen, sondern in der Regel in der Größenordnung von 2 bis 5 m liegen. Dieser Umstand erleichterte zwar die tachymetrische Aufnahme in Aufwand und Zeitumfang enorm, führte aber zwangsläufig zu einer lediglich groben Erfassung der Höhle und noch entscheidender zu Komplikationen bei der Auswertung mit den für Laserscannerdaten konzipierten Softwarepaketen. Der Einsatz eines Laserscanners wurde aus verschiedenen Gründen nicht in Erwägung gezogen. Dies war nicht nur eine finanzielle Frage, sondern die Arbeitstechniken und Methoden sollten den Gegebenheiten in Indonesien angepasst sein (»appropriate technology«), um den Pilotcharakter dieses Projektes zu unterstreichen. Hinzu kommen die extremen klimatischen Bedingungen (98,5% bis 100% Luftfeuchtigkeit, kondensierend, bei 26° C), unter denen keine Gewährleistung für das einwandfreie Arbeiten der Laserscannertechnik gegeben werden kann. In einem nachfolgenden Projekt soll allerdings auch diese Anwendung wenn möglich berücksichtigt werden.

### 5.1 Dreiecksvermaschung

Die Punktwolke wurde nach Bereinigung des Datenmaterials einer Dreiecksvermaschung zugeführt, um daraus möglichst automatisiert ein 3D-Oberflächenmodell zu generieren. Zum Einsatz kamen dabei zwei unterschiedliche Softwarekonzepte: eine so genannte zweidimensionale Vermaschung mit dem Produkt Autodesk Land Desktop und eine dreidimensionale Vermaschung mit der Software Wrap der Firma Geomagic. Letztere, in einer älteren Version verwendet, ist eine Software, die in erster Linie zur Auswertung von Laserscanner-Punktwolken geschrieben worden ist. Die Problematik der sehr großen Punktabstände innerhalb der Punktwolke macht je nachdem den Einsatz dieser oder jener Software sinnvoll. So wurde zum Beispiel zum Modellieren von durchgängigen »Schalen« für Decke und Boden die zweidimensionale Vermaschung mit dem Land Desktop angewendet. Für große Säulen wurde jedoch die dreidimensionale Vermaschung bevorzugt, die beide Modellteile miteinander verbindet und fließend in diese übergeht. Für die Modellierung der ganzen Höhle ist diese Software in Zusammenhang mit

den Punktabständen wiederum nicht zu empfehlen, weil eine große Anzahl an Dreiecksflächen zwischen Decke und Boden erzeugt werden, und dies nicht nur an Stellen, wo der Abstand zum nächsten Punkt der gleichen »Schale« größer ist als der zu Punkten der jeweils anderen »Schale«. Vermutlich ist dies darauf zurückzuführen, dass die Punktabstände untereinander alle in der gleichen Größenordnung liegen und nicht im Bereich von Faktor 10 oder 100 wie bei einer Laserscanner-Punktwolke. Dies bedeutet, die manuelle Nachbearbeitung nimmt unter Umständen deutlich mehr Zeit in Anspruch, als durch die automatisierte Erzeugung eingespart wird. Die hybride Verwendung beider Systeme stellt bei der hier gegebenen Konstellation also die beste Variante bei der Auswertung dar.

## 5.2 Modellierung

Die Automatisierung beim Generieren eines 3D-Modells ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht derart ausgereift, dass keine manuellen Korrekturen und Nacharbeiten mehr anfallen. Diese Arbeiten machten im hiesigen Fall sogar den Großteil der Auswertung aus und wurden mit AutoCAD Map durchgeführt. Der angesprochene große Punktabstand ist dabei die Hauptursache für falsche Vermaschungen. Unterschieden werden kann in grobe Fehlvermaschungen und in eine »falsche Entscheidung«. Beispielsweise gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten, vier Punkte mit zwei Dreiecksflächen miteinander zu verbinden. Die verbindende Dreiecksseite bildet dann in der Regel eine deutliche Raumkante aus, die sich im richtigen Fall genau dem Modell anschmiegt, im anderen Fall jedoch eine markante Barriere darstellen kann, die nicht der Realität entspricht. Neben der Bearbeitung der groben Fehler und der Fehlvermaschungen galt es auch noch, das bereits bestehende Wehr im oberen Teil der Höhle und die geplanten Anlagen am unteren Ende zu modellieren und zu integrieren. Diese können nur schlecht durch eine automatische Generierung erzeugt werden, lassen sich aber

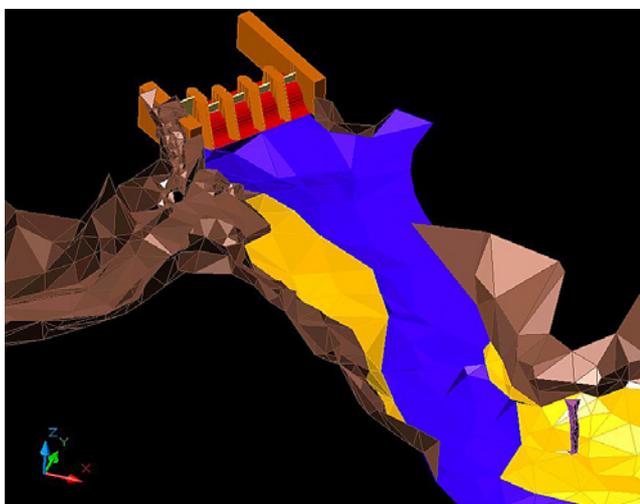


Abb. 9: Modell der bestehenden Wehranlage

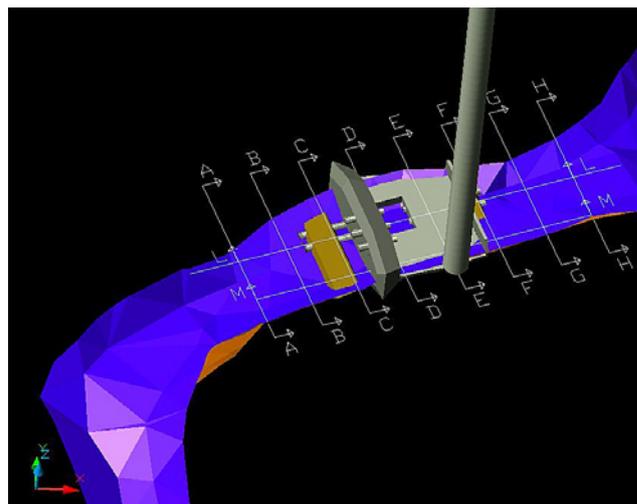


Abb. 10: Geplantes Sperrbauwerk mit Kleinwasserkraftanlage und Zugangsschacht

dank ihrer klaren geometrischen Formen leicht modellieren bzw. existieren nicht, sondern sind noch lediglich Gegenstand der Planung. Das entstandene dreidimensionale Gesamtmodell der Höhle und ihrer künstlichen Bauten konnte dann für jegliche Form der Weiterverarbeitung verwendet werden (Abb. 9 und 10).

## 5.3 Visualisierung

Für Visualisierungen zu Präsentations-, aber auch zu Simulationszwecken wurde die Software Discreet 3D Studio Max in der Version 5 herangezogen. Diese erlaubt es, bereits existierende Modelle im DXF-Format zu importieren und dort zu visualisieren. Das Programm besitzt zwar selbst ebenfalls Funktionalitäten zur Modellierung und behandelt Körper in einem metrischen dreidimensionalen Raum, eignet sich aber eher zum Freihandmodellieren und weniger zum Arbeiten mit festen geometrischen Zwangsbedingungen. Daher ist es aus geodätischer Sicht meist sinnvoller, erst das fertige Modell zu importieren und dann die reine Visualisierung mit dieser Software vorzunehmen. Die Visualisierungsmöglichkeiten sind äußerst zahlreich und auf Anhieb kaum zu überblicken. Zunächst muss das Modell allerdings in Objekte aufgeteilt werden, da sich die meisten Funktionen nur auf Elemente (Punkte, Flächen) eines Objektes anwenden lassen. Diese Objekte können beim Import allerdings auch direkt aus Layern oder Farben des CAD-Modells abgeleitet werden. Als Funktionen können den Objekten beispielsweise Materialien zugewiesen werden, die nicht nur eine Farbe oder ein aufzumappendes Bild (Bitmap) enthalten, sondern es kann auch mit Schatten, Transparenz, Spiegelungen, Glanz und vielem mehr gearbeitet werden. Für eine Visualisierung reicht diese Zuweisung von Materialien allein allerdings noch nicht aus. Das Modell muss nach eigenem Ermessen mit Lichtquellen aller Art ausgeleuchtet werden, da es ansonsten beim Rendern, dem

Erzeugen der eigentlichen Visualisierung, im Dunkeln bleibt. Diese Perspektive wird durch die jeweilige Position einer Kamera festgelegt.

Um auch Bewegung einzuführen und nicht nur stehende Bilder zu erhalten, können sowohl alle Objekte des Modells als auch die Kamera selbst animiert werden. Die Animation der Kamera beispielsweise ermöglicht einen Durchflug durch bzw. Überflug über das Modell, die Objekte können sich durch Animation gegeneinander innerhalb des Modells bewegen. Für die Visualisierung der Höhle sehr nützlich sind außerdem so genannte Partikeleffekte, mit denen fließendes Wasser oder Dampf simuliert werden können.

Die Arbeiten an der Visualisierung des Modells der Höhle Gua Bribin in Indonesien sind allerdings noch nicht abgeschlossen.

## 6 Ausblick

Nachdem im Dezember 2004 die Schachtbohrung durch die Firma Herrenknecht erfolgreich fertig gestellt werden konnte, laufen seit dem Abschluss der Regenzeit im Frühjahr 2005 die Ausbaurbeiten auf Hochtouren. So wurde die Wasserhaltung für die Baustelle in der Höhle inklusive der Einbringung von Grundablassrohren abgeschlossen. Anhand der Ausbrucharbeiten und Kernbohrungen im Bereich des Felswiderlagers lassen geologische und geotechnische sowie Sickerwasseruntersuchungen einen erfolgreichen Anstau in der Höhle erwarten, so dass nach Installation von Pumpenmodulen und Steuerungssystem eine Inbetriebnahme der Gesamtanlage im Verlauf des Jahres 2006 vorgesehen ist.

Mittlerweile hat das BMBF einen neuen Förderschwerpunkt initiiert: Integriertes Wasserressourcen-Management (IWRM) einschließlich des notwendigen Technologie- und Know-how-Transfers. Die am hier dargestellten Projekt beteiligten Partner, um weitere Kompetenz aus dem Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) erweitert, haben sich erfolgreich an einem Ideenwettbewerb beteiligt, was sich in einem neuen Projektantrag »IWRM für die Zielregion Mittel-Java in Indonesien« niederschlagen wird (siehe Oberle u. a. 2005), der die folgenden Zielsetzungen beinhaltet:

- Erkundung von Wasserressourcen im Karstgebiet und deren Erschließung mit Hilfe nachhaltiger, regenerativer Förderungstechnologien,
- Aufbau und Optimierung eines Wasserverteilungssystems,

- Entwicklung angepasster Aufbereitungs- und Abwasserbehandlungstechnologien,
- Installation effektiver GIS-basierter Wassermanagementtools sowie
- sozioökonomische und politische Umsetzungsstrategien.

Das vorgesehene geodätische Teilprojekt wird seinen Schwerpunkt in der Erstellung eines für alle anderen Partner offenen, raumbezogenen Informationssystems haben, aber auch eine allgemeine vermessungstechnische Begleitung des Gesamtprojektes beinhalten.

### Dank

Die Autoren bedanken sich beim BMBF für die finanzielle Unterstützung dieses Projektes und bei den Verbundpartnern für die ausgezeichnete Zusammenarbeit.

### Literatur

- Nestmann, F. und P. Oberle: Erkundung und Grenzen der Wasser- und Energiebewirtschaftung großer unterirdischer Wasservorräte in Wonosari, Yogyakarta, Java, Indonesien. Machbarkeitsuntersuchung im Auftrag des BMBF, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe (TH), 2002.
- Nestmann, F. und P. Oberle: Erschließung und Bewirtschaftung unterirdischer Wasservorkommen in Karstgebieten auf Java, Indonesien. Fridericana, Zeitschrift der Universität Karlsruhe (TH), Heft 65 (in Vorbereitung), 2006.
- Oberle, P., Kappler, J. und B. Unger: Integriertes Wasserressourcen-Management (IWRM) in Gunung Kidul, Java, Indonesien. Schlussbericht zur Machbarkeitsuntersuchung im Auftrag des BMBF, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Universität Karlsruhe (TH), 2005.
- Oppen, S. und R. Jäger: Das Softwarepaket NETZ2D. Mitteilungen des DVW-Landesvereins Baden-Württemberg 38, 190–209, 1991.

BMBF-Verbundprojekt : <http://www.hoehlenbewirtschaftung.de>.

### Anschrift der Autoren

Dr.-Ing. Stephan Kupferer  
 Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Günter Schmitt  
 Dipl.-Ing. Martin Vetter  
 Dipl.-Ing. Jan Zimmermann  
 Geodätisches Institut, Universität Karlsruhe (TH)  
 Englerstraße 7, 76128 Karlsruhe  
 iwrm@gik.uni-karlsruhe.de