

Bau eines Höhlenkraftwerkes zur Trinkwassergewinnung auf Java

Teil 1: Gesamtkonzept zur energetischen Nutzung unterirdischer Wasserressourcen in Karstgebieten

Franz Nestmann, Peter Oberle, Muhammad Ikhwan, Punit Singh

Zusammenfassung

Der Beitrag behandelt ein aktuelles vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördertes Vorhaben der Universität Karlsruhe (TH) zum Bau einer unterirdischen Wasserförderanlage in einem Karstgebiet auf Java, Indonesien. Wie in vielen Karstgebieten weltweit herrscht auch dort insbesondere während der Trockenzeit ein akuter Wassermangel. Gleichzeitig existieren jedoch große unterirdische Wasserressourcen, die bisher weitgehend ungenutzt über ein weitreichendes Höhlensystem in den Indischen Ozean abfließen. Eine nachhaltige Lösung zur Nutzung dieser unterirdischen Wasserströme wurde bislang nicht gefunden.

Zielsetzung des aktuellen Verbundprojektes ist es, die Trink- und Brauchwasserversorgung der Bevölkerung während der Trockenzeit durch den Bau eines unterirdischen Speichers unter Nutzung regenerativer Energiequellen sicherzustellen. Das erarbeitete Lösungskonzept sieht den Aufstau des unterirdischen Flusses um ca. 10 bis 15 Meter durch den Bau eines Sperrbauwerkes vor. Mittels Wasserkraft soll über den Basisabfluss des Höhlenflusses (ca. 1-2 m³/s) die Energie zum Betrieb von Pumpsystemen bereitgestellt werden, die ausreichend Trink- und Brauchwasser für ca. 80.000 Menschen an die Oberfläche fördern.

Das Projekt wird neben dem BMBF von den Industriepartnern Herrenknecht AG, KSB AG, VAG GmbH sowie Walcher Wasserkraft GmbH unterstützt. Der Bau des Höhlenkraftwerkes soll Ende 2008 abgeschlossen sein.

In dem vorliegenden ersten Teil des Beitrages wird ein Überblick über das Verbundprojekt gegeben. Der zweite Teil des Beitrages beschreibt die Konzeption und Realisierung des Sperrwerkes aus Beton.

1 Hintergrund

Wasser ist die Grundlage jeglichen Lebens – eine zuverlässige Wasserversorgung die Grundlage jeglicher Zivilisation! Für derzeit etwa 1,1 Mrd. Menschen – etwa ein Sechstel der Weltbevölkerung – ist unzureichender Zugang zu Trinkwasser Bestandteil des täglichen Kampfs ums Überleben.

Der Inselstaat Indonesien wird landläufig nicht mit Wasserknappheit assoziiert. Knapp vier Fünftel der indonesischen Bevölkerung besitzen einen gesicherten Zugang zu Trinkwasser. Allerdings existieren auch in Indonesien räumliche Disparitäten hinsichtlich der Versorgung mit Trinkwasser. Auf dem aus Kalkstein aufgebauten Südrand des Archipels ist wegen der weit fortgeschrittenen Verkarstung des Untergrundes eine natürliche Speicherung des Niederschlags, welcher hier fast ausschließlich zwischen den Monaten Oktober bis April fällt, kaum möglich.

Die Gunung Sewu, das Land der „tausend Hügel“, an der Südküste der Insel Java ist eine solche Region (Abbildung 1). Insbesondere während der Trockenzeit herrscht in der landwirtschaftlich geprägten Gegend ein akuter Wassermangel (Abbildung 2). Gleichzeitig existieren jedoch große unterirdische

Wasserressourcen, die bisher weitgehend ungenutzt über ein weitreichendes Höhlensystem in den Indischen Ozean abfließen. Aufgrund der Speicher- bzw. Pufferkapazität des Karstaquifers führen die unterirdischen Flüsse auch in der Trockenzeit eine beträchtliche Abflussmenge. Seit Jahrzehnten wurden von Seiten der indonesischen Regierung große Anstrengungen unternommen, die unterirdischen Wasserströme nutzbar zu machen. Eine nachhaltige Lösung wurde nicht gefunden.



Abb. 1: Lage des Karstgebietes Gunung Sewu auf der Insel Java, Indonesien



Abb. 2: Die Karsthügellandschaft in der Regen- und Trockenzeit

Im Jahr 2002 wurde vom Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) der Universität Karlsruhe ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), sowie deutschen Industriepartnern gefördertes Verbundprojekt initiiert, mit dem Ziel, das Höhlenwasser über regenerative Wasserkraft zu fördern [10]. Hierdurch können Wirtschaftlichkeit und Ökologie in idealer Weise verbunden werden, was gerade in den bzgl. der Wasserqualität hochsensiblen Karstgebieten von besonderer Bedeutung ist. Ganz bewusst konzentrieren sich die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf einfach handhabbare Technologien, die an die Bedürfnisse von Mensch und Natur angepasst sind. Im Rahmen der deutsch-indonesischen Kooperation wird in der Höhle Gua Bribin zurzeit ein Lösungsansatz erprobt. Mitte 2008 soll an dieser Demonstrationsanlage das erste Wasser über eine Steigleitung in ein 220 m höher gelegenes Verteilerbecken auf einem Karsthügel gefördert werden und 80.000 Menschen in den umliegenden Hüttensiedlungen versorgen. Weitere Projekte in angrenzenden Regionen sind geplant.

Die Projektumsetzung erfordert eine enge Zusammenarbeit unterschiedlicher Fachdisziplinen. So sind neben dem IWG insgesamt fünf weitere Institute der Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften beteiligt: Das Geodätische Institut, das Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, das Institut für Mineralogie und Geochemie, die Versuchsanstalt für Stahl, Holz, Steine sowie das Institut

für Boden und Felsmechanik. Weitere Verbundpartner sind das Institut für Geographie der Universität Gießen sowie die Industriepartner Herrenknecht AG (Tunnelvortriebstechnik), KSB AG (Pumpentechnologie), VAG GmbH (Grundablassarmaturen) sowie Walcher Wasserkraft GmbH (Steuer- und Regelungstechnik).

In Indonesien wurde über die Aktivitäten der letzten Jahre unter Einbeziehung aller bedeutenden regionalen und nationalen Behörden und Industriepartner ein gut funktionierendes Netzwerk aufgebaut. Zudem bestehen intensive Kooperationen mit mehreren Universitäten und Forschungseinrichtungen sowie enge Kontakte zur lokalen Bevölkerung und ansässigen Nichtregierungsorganisationen. Die große Bedeutung und Akzeptanz der deutschen Aktivitäten wurde Ende 2004 mit der Besichtigung der Baustelle durch den indonesischen Staatspräsidenten S. B. Yudhoyono und drei Monate später durch die Höhlenbegehung von Bundesforschungsministerin Edelgard Bulmahn unterstrichen.

2 Untersuchungsgebiet Gunung Kidul

Der Verwaltungsdistrikt Gunung Kidul liegt in Zentraljava etwa 100 km südöstlich der Stadt Yogyakarta am Fuße des Vulkans Merapi. Naturräumlich besteht Gunung Kidul aus drei Teilregionen. Im Norden erhebt sich eine Vulkankette, die Gunung Baturagung, die den Distrikt Gunung Kidul nach Norden hin von den eigentlich für Java typischen fruchtbaren Reisbauebenen abgrenzt. Im Zentrum Gunung Kiduls befindet sich das auf Mergelkalken aufgebaute Wonosari Plateau, im Süden und Osten schließt sich eine 1400 km² große Karstlandschaft, die Gunung Sewu an.

Das gesamte Gebiet der Gunung Sewu ist von hunderten, miteinander vernetzten Höhlen durchzogen, welche im Laufe der Jahrhunderte durch Korrosion (Lösungsprozesse) und Erosion (mechanischer Abrieb) entstanden sind; daraus resultiert der komplette Austausch jeglichen Oberflächenabflusses durch ein weit verzweigtes Abflusssystem im Untergrund. Das Wasser dieser unterirdischen Flüsse tritt fast vollständig erst wieder in Quellen an der Küste zutage. Nur in den Talsenken finden sich stellenweise Bereiche mit undurchlässigem Tonboden, welche zu kleinen Seen („Telagas“) aufgestaut sind. Diese flachen Karstwannen können aufgrund der hohen Verdunstungsrate jedoch nur während der Regenzeit von der Bevölkerung als Wasserquelle genutzt werden. [3]

Wegen der naturräumlichen hydrogeologischen Gegebenheiten sowie dem Mangel an nachhaltigen Technologien zur Wassergewinnung wird Gunung Kidul mit seinen 750.000 Einwohnern als das „Armenhaus Javas“ bezeichnet. Besonders betroffen

sind die ländlichen Hüttensiedlungen der Gunung Sewu. [12]

Bereits Anfang der 80er Jahre hat die indonesische Regierung begonnen, die unterirdischen Wasserressourcen zu erschließen. Es wurden mit großem Aufwand dieselbetriebene Pumpanlagen errichtet, Speicherreservoirs gebaut und Wasserleitungen verlegt. Aufgrund von Fehlplanungen, Defekten und mangelnden Energie- bzw. Finanzmitteln zum Betrieb der Pumpen ist durch viele dieser Leitungen allerdings bis heute kein Wasser geflossen. Abgesehen von den ökologischen Risiken beim Einsatz von Dieselgeneratoren sind für die Bevölkerung aufgrund der hohen Betriebs- und Wartungskosten der Pumpanlagen ohnehin nur geringe Wassermengen bezahlbar. Dies gilt auch für die Möglichkeit, sich über Tanklastwagen mit Wasser versorgen zu lassen. Daher ist ein Großteil der ländlichen Bevölkerung auf Alternativen, wie Brunnen, Zisternen und Telagas angewiesen. Diese Versorgungsquellen reichen aber bei Weitem nicht aus, den Bedarf zu decken. Während der Trockenzeit wird das Wasser oftmals direkt aus den Höhlen in stundenlanger Arbeit mit Kanistern nach Hause getragen. Viele Haushalte müssen während der Trockenzeit mit weniger als 10 Liter pro Kopf und Tag auskommen.

3 Erkundung der Höhlensysteme

Seit vielen Jahren besteht von Seiten des Instituts für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) durch Stipendiaten und ehemalige Doktoranden ein enger Kontakt zu mehreren Universitäten und Forschungseinrichtungen in Indonesien, speziell in Mitteljava. So wurde von Seiten der Regierung der Yogyakarta Special Province im Jahr 2000 die konkrete Bitte um Unterstützung bei der Entwicklung nachhaltiger Lösungskonzepte zur Nutzung der unterirdischen Wasservorkommen in Gunung Kidul herangetragen und somit das Initial zu einer vom BMBF geförderten Machbarkeitsstudie gegeben.

Im Rahmen der Vorstudie konnte auf die Berichtsbände einer in den 80er Jahren durchgeführten interdisziplinären Datenerfassung des britischen Consulting-Büros Sir MacDonald & Partners zurückgegriffen werden [5,6]. Von besonderem Interesse waren die Aufzeichnungen einer 2-jährigen Höhlenerkundung durch 5 britisch-indonesische Expeditionsteams. Insgesamt wurden 160 von damals 246 bekannten Höhlen erkundet. Auf Basis dieser Aufzeichnungen konnte die Auswahl der im Rahmen der Machbarkeitsuntersuchung des IWG zu untersuchenden Höhlen getroffen werden. Die weiteren Erkundungen und Datenerhebungen durch das IWG erfolgten mit Unterstützung ortskundiger Speleologen (Abbildung 3).



Abb. 3: Einstieg in das Höhlensystem zur Erkundung der unterirdischen Wasserressourcen

4 Rückwärtslaufende Pumpen als angepasste Technologie

Im Rahmen der Vorstudie wurde folgende Grundkonzeption zur nachhaltigen Nutzung der unterirdischen Wasserressourcen entwickelt:

Durch ein Sperrwerk, über welches der Höhlenquerschnitt komplett geschlossen werden kann, soll das kontinuierlich zuströmende Wasser aufgestaut und die notwendige Druckhöhe erzeugt werden, um einen Teil des Abflusses über ein wasserkraftbetriebenes Pumpsystem an die Oberfläche zu fördern. Der unterirdische Stausee kann dem Bedarf entsprechend bewirtschaftet werden.

Um dem Gedanken der „angepassten Technologie“ Rechnung zu tragen, ist zur Energiegewinnung anstelle von Turbinen der Einsatz invers betriebener Pumpen vorgesehen, die ihrerseits über eine Welle bzw. ein mechanisches Getriebe direkt mit Pumpen für die Wasserförderung gekoppelt werden. Der Vorteil von Pumpen als Turbinenersatz ist, dass sie weltweit leicht verfügbar, kostengünstig und zudem sehr robust und wartungsfreundlich sind.

Mit dem Einsatz von „Pumpen als Turbinen“ (PAT) lassen sich bei Wahl geeigneter Pumpentypen Wirkungsgrade von über 80% erreichen. Um die Eignung verschiedener Pumpentypen für den Einsatz im Turbinenbetrieb zu ermitteln und deren Wirkungsgrade weiter zu optimieren wurde im Theodor-Rehbock-Wasserbaulaboratorium des IWG eine umfassende Studie durchgeführt (Abbildung 4, [13]). Über gezielte Modifikationen an der Laufrad- bzw. Gehäusegeometrie der Pumpen konnten die Strömungsverluste beim inversen Betrieb signifikant reduziert werden und Wirkungsgrade erreicht werden, die im optimalen Betriebspunkt an die von Turbinen heranreichen.

Ein wesentlicher Nachteil von PAT gegenüber echten „Turbinen“ ist das Fehlen einer regelbaren Leiteinrichtung zur Anpassung an ein schwankendes Wasserangebot. Durch parallelen Einbau mehrerer

und großemäßig unterschiedlicher Pumpenmodule, die mit einem Minimum an Regelaufwand je nach verfügbarer Abflussmenge zu- oder abgeschaltet werden, kann jedoch ein beliebig großes Abflussspektrum mit optimalem Wirkungsgrad durchfahren werden. Abflüsse größer dem Bemessungswert der Gesamtanlage werden über Entlastungsrohre mit entsprechend großen Querschnitten durch das Sperrwerk abgeführt.

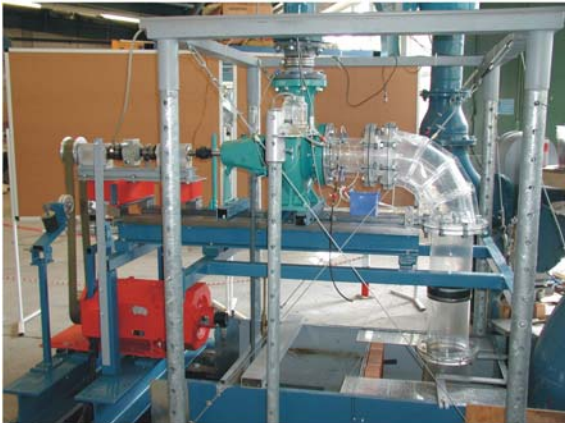


Abb. 4: Teststand zur Optimierung von Pumpen im Turbinenbetrieb am Theodor-Rehbock-Wasserbaulaboratorium des IWG [13]

5 Pilotprojekt Gua Bribin

Bezüglich einer pilothaften Umsetzung des Wasserförderkonzeptes stellte sich die Höhle Gua Bribin als besonders geeignet heraus (Abbildung 5). Über einen ca. 350 m langen engen Zugangsstollen, erreicht man einen unterirdischen Flusslauf, den Kali

Bribin. Hier wurde bereits in den 80er Jahren eine ca. 2,5 m hohe Wehranlage errichtet, die den Fluss auf einer Länge von 1,5 km rückstaut (Abbildung 6). Einziger Zweck dieses Bauwerkes ist die Sicherstellung einer ausreichenden Überdeckung der oberhalb der Wehranlage installierten Pumpen, welche über Dieselgeneratoren am Höhleneingang betrieben werden. Spätestens hier wird deutlich, welche enormen Anstrengungen in der Region bisher unternommen wurden, um das Höhlenwasser nutzbar zu machen. Leider stehen die Pumpen aufgrund der hohen Wartungs- und Betriebskosten die meiste Zeit still.



Abb.6: Alte unterirdische Wehranlage mit Radarmesspegel des IWG

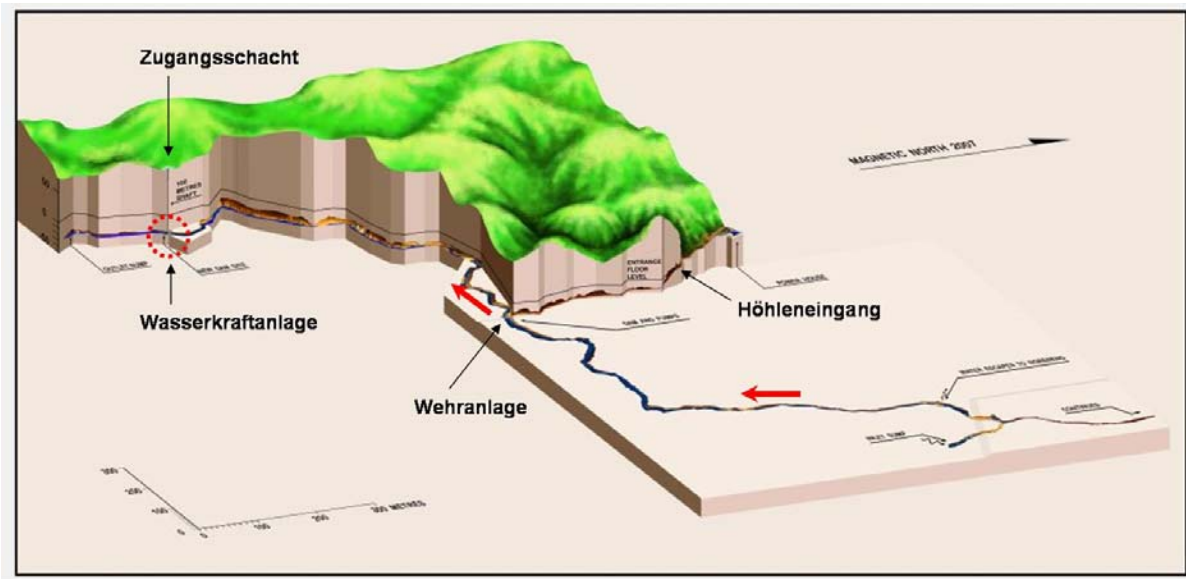


Abb. 5: Lageplan der Höhle Gua Bribin

Der durchflossene Höhlenstrang hat eine Gesamtlänge von etwa 3 km mit einem Gesamtvolumen von

ca. 500.000 m³. Während der Trockenzeit betragen die Abflussmengen zumeist über 1,5 m³/s, in der

Regenzeit können die Abflüsse auf ein Mehrfaches anschwellen. Die Höhle wird am oberen und unteren Ende durch Siphons begrenzt. Vor dem unterstromigen Siphon staut sich das Wasser auf einer Länge von ca. 300 m zu einem natürlichen See zurück. Die elliptische Querschnittsfläche hat eine Breite von 10 m und eine Höhe von 6 m. Aufgrund der vorhandenen geometrischen Randbedingungen und den Ergebnissen einer geologischen Voranalyse wurden hier gute Voraussetzungen für die bautechnische Realisierung eines Einstaubauwerkes erwartet. Das Sperrwerk soll das natürliche Gefälle der Höhle ausnutzen und das Wasser des Kali Bribin auf ein Niveau von 10 bis 15 m über den Wasserstand des Höhlensees aufstauen (Abbildung 7). Der Bemessungsabfluss der Gesamtanlage liegt bei ca. 2 m³/s. Unter Vollauslastung könnte die Anlage genügend mechanische Leistung erzeugen, um pro Sekunde über 65 Liter Wasser in ein ca. 220 m höher liegendes Speicherbecken zu fördern. Von dort wird das Wasser in die umliegenden Dörfer verteilt.

Im 24 Stunden Betrieb sollen somit 80.000 Bewohner mit 70 Liter pro Kopf und Tag (lpcd) versorgt werden. Die WHO-Richtlinie fordert eine Mindestversorgung von 50 lpcd.

Dass Gua Bribin das Wasser auch halten wird, lassen Sedimentablagerungen vulkanogenen Ursprungs unter der Höhlendecke sowie mm- bis cm-

mächtige schwarzbraune Mn-/Fe- reiche Oxidlagen, welche die Kalksteine umkrusten, erwarten. Beides sind Hinweise darauf, dass die Höhle bereits in früheren Zeiten auf natürliche Weise bis unter die Decke eingestaut war. Des Weiteren können auch während der Regenzeit keine lateralen Wassereinträge oder größere Mengen an Sickerwasser beobachtet werden. Weitere Anzeichen einer geringen Durchlässigkeit des Felskörpers ergab die Auswertung von Tracerversuchen und Abflussbilanzierungen zwischen den vernetzten Höhlen. So kann der Fließweg des Kali Bribin über eine Länge von 17 km bis zum Indischen Ozean verfolgt werden, ohne Hinweise auf signifikante Mengenverluste zu finden [1]. Auch die bereits seit Jahrzehnten existierenden Einstaubereiche der kleineren Wehranlagen wie z.B. in Gua Bribin weisen keinerlei Wasserverluste auf. Einen gewissen Abdichtungseffekt könnten auch die genannten Feinsedimentablagerungen bewirken, welche flächendeckend die Böschungen überziehen und stellenweise eine Mächtigkeit von > 1 m aufweisen. Die Prognose der Einstaumöglichkeit wurde im Verlauf der Projektarbeiten durch umfassende Bohrkernanalysen sowie Wasserschluckversuche im Bereich des Sperrwerkes unterstützt (siehe Teil 2, [7]).

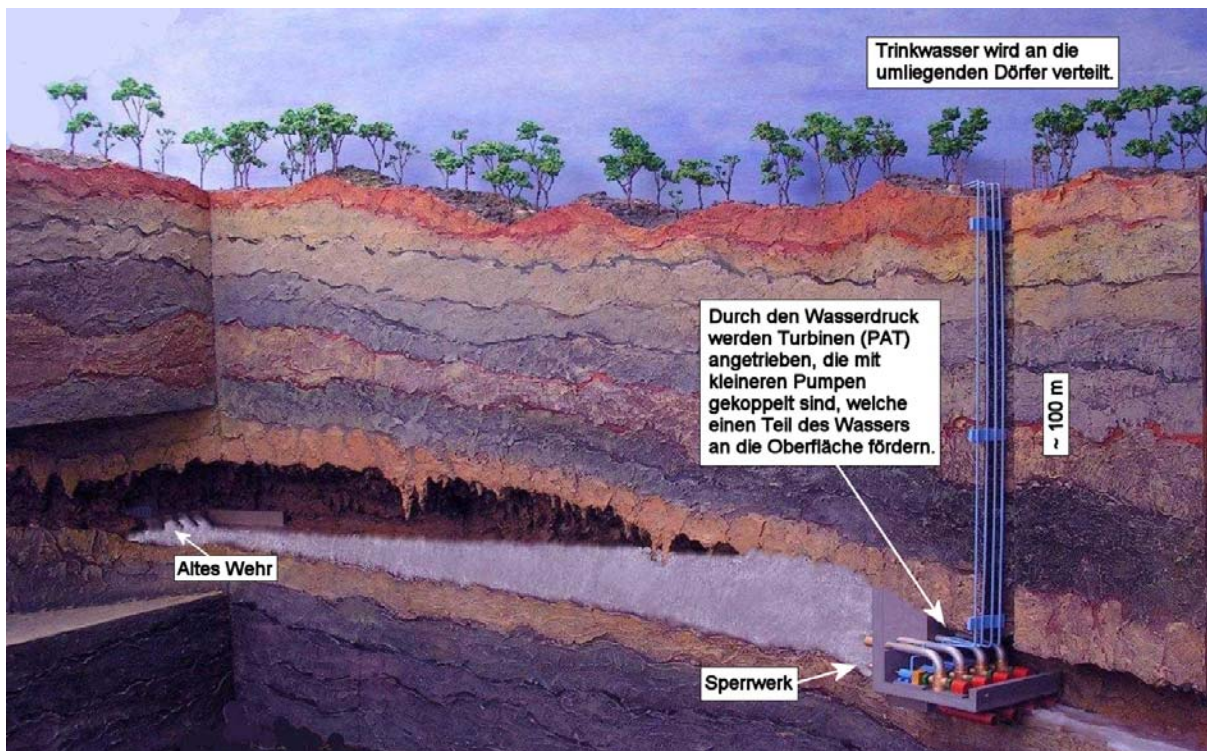


Abb. 7: Prinzipskizze der unterirdischen Wasserförderanlage

5.1 Geodätische Messkampagne

Für den Ausbau der Höhle war die Errichtung eines vertikalen Zugangsschachtes zum Einbringen von Baumaterialien, Rohrleitungen und Fördermodulen sowie für die späteren Betriebs- und Wartungsarbeiten notwendig. Zur Festlegung der Bohrstelle wurde 2003 vom Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe (GIK) ein insgesamt 2,4 km langer Polygonzug mittels moderner Laser-Tachymetrie durch die Höhle und oberirdisch durch die felsige Karsthügellandschaft abgesteckt. In dem ca. 200 m langen Seebereich am Höhlenende konnten Standpunkte nur von Schlauchbooten aus über selbstgefertigte Wandkonsolen realisiert werden. Die Anforderungen an die Messgenauigkeit waren enorm da der Schacht die Höhlenwand exakt tangential anschnitten musste.

Die numerische Analyse der zu erwartenden Fehlerfortpflanzung ergab eine relative Fehlerellipse mit den Halbachsen 19,5 und 1,6 cm. Das bedeutete, dass die ermittelte Bohrstelle an der Oberfläche mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 40 % weniger als 20 cm gegenüber dem Bohrziel in der Höhle verschoben lag. Die Bohrtiefe wurde auf 98,5 m ermittelt.

5.2 Bau des Zugangsschachtes

Als weltweit agierender Spezialist in der horizontalen Tunnelvortriebstechnik stellte die Entwicklung von Vertikalbohrmaschinen für die Firma Herrenknecht AG aus Schwanau ein interessantes Entwicklungsfeld dar. Die speziell für den Einsatz in Indonesien entwickelte Schachtabsenkanlage mit einem Durchmesser von 2,5 m ist mit einem Bohrgerät („Schräme“) ausgerüstet, welches vom Maschinenfahrer direkt darüber sitzend mit Steuerhebeln bedient wird [4]. Der hydraulisch angetriebene Schräm Kopf hat eine Leistung von 110 kW und rotiert am Schrämarm kreisförmig um seine eigene Achse, um den Fels abzubauen. Die hohen Gesteinsfestigkeiten (Würfeldruckfestigkeit 80 MPa) machten den Einsatz spezieller Rundschaftmeißel (Bits) notwendig. Das Abbauwerkzeug führt das abgebaute Material einem Schalengreifer zu, der von einer zweiten Person auf einer Plattform oberhalb bedient wird. Über einen seitlich befindlichen Förderschacht wird das Bohrgut 6 m nach oben befördert und über eine Rutsche in einen Förderkübel mit einem Fassungsvermögen von 1,5 m³ geleitet. Dieser wird nach vollständiger Füllung mit einem Kran an die Oberfläche gezogen (Abbildung 8).



Abb. 8: Schachtabsenkanlage der Herrenknecht AG [4]

Zur Sicherung des Schachtes werden sukzessive Stahlsegmente („Tübbinge“) nach einer gebohrten Tiefe von 0,7 – 1 m in den Schacht abgelassen, dort zu einem Ring verschraubt und mit Spezialankern im Fels verdübelt (Abbildung 9). Der Zwischenraum, der durch den Überschneid zwischen Fels und Stahlmantel entsteht, wird mit Mörtel kraftschlüssig verpresst. Die Maschine ist über vier Zugstangen mit einem Stahlrahmen am Schachtkopf verbunden und wird nach jedem Bohrabchnitt über Hohlkolbenzylinder gleichmäßig abgeteuf. Während des Bohrvorganges sind hydraulisch betriebene Grippereinheiten aktiv, die den Schild im Gestein in Position halten. Das Vermessungssystem zum lotrechten Abteufen wurde vom GIK eingerichtet und besteht aus zwei Laserloten an der Schachtoberfläche und einer Zieltafel an der Maschine.

Mit den Bohrarbeiten wurde im Juli 2004 begonnen. Die Bohrarbeiten wurden von der Firma Herrenknecht zusammen mit der indonesischen Baufirma PT Wijaya Karya durchgeführt. Der Schachtdurchbruch in die Höhle erfolgte Anfang Dezember 2004.



Abb. 9: Blick in den Zugangsschacht

5.3 Anlagenplanung

Parallel zu den Vermessungs- und Schachtbohrarbeiten wurden die Entwurfsplanungen für die Dimensionierung und konstruktive Ausführung des Sperrwerkes sowie Felssicherungsmaßnahmen in enger Kooperation mit dem Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IfMB) sowie dem Institut für Boden- und Felsmechanik (IBF) vorangetrieben. Hierbei mussten die besonderen Randbedingungen bezüglich des geringen Platzangebots und der eingeschränkten Zugänglichkeit bei Bau und Betrieb, aber auch die personellen und maschinentechnischen Möglichkeiten der ausführenden indonesischen Baufirma PT Wijaya Karya berücksichtigt werden. Dies erforderte eine enge Abstimmung mit den indonesischen Kooperationspartnern und war ein äußerst zeitintensiver iterativer Prozess.

Die Geometrie der dreidimensional gekrümmten Mauer wurde am IfMB mit Hilfe numerischer Methoden so optimiert, dass zur Lastabtragung nahezu keine Stahlbewehrung erforderlich ist. Trotzdem ist das Bauwerk mit durchschnittlich 1,5 m Dicke relativ schlank, um die beim Betonieren auftretenden Wärmespannungen möglichst gering zu halten. Als besonders schwierig stellte sich eine erste Beurteilung der Tragfähigkeit der Höhlenwände dar, da aufgrund des kilometerlangen unterirdischen Zugangs zum geplanten Sperrwerksbereich nur leichtes Gerät zur Erkundung eingesetzt werden konnte.

Neben der Dimensionierung des Sperrwerkes mit ausreichender Einbindetiefe in das Karstgefüge (Felswiderlager) konzentrierte sich das IfMB auch auf die Analyse der vor Ort verfügbaren Baustoffe sowie die Entwicklung speziell angepasster Betonrezepturen in Zusammenarbeit mit der Gadjah Mada Universität Yogyakarta.

Besonders innovativ im Sinne „angepasster Technologie“ war zudem die Entwicklung einer unter Tage anwendbaren Methode zur Herstellung von Kofferdämmen zur Baugrubenentwässerung. Da Spundwände, wie sie an oberirdischen Fließgewäs-

sern einsetzbar sind, in der Höhle nicht eingebracht werden können, sollte die Wasserhaltung im langsam durchflossenen Höhlensee über Unterwasserbeton im Ausgussverfahren („prepacked concrete“) umgesetzt werden. Die Optimierung der entmischungsfreien Rezeptur sowie Einbringtechnik erfolgte im Rahmen einer umfangreichen Versuchsreihe.

Eine ausführliche Darlegung zur bautechnologischen Konzeption des Sperrwerkes findet sich in Teil 2 dieses Beitrages. [7]

Vom Institut für Mineralogie und Geochemie (IMG) wurden weitere geologische Analysen u. a. unter Einsatz geoelektrischer und seismischer Messmethoden in Zusammenarbeit mit dem Institute of Technology Surabaja zur Exploration von Hohlräumen und potentiellen Wasserwegsamkeiten durchgeführt. Zudem wurden der Wasserchemismus sowie die Verwitterungsresistenz des Karstgesteins analysiert. Nach Fertigstellung der Schachtbohrung konnten im Bereich des geplanten Sperrwerkes in Zusammenarbeit mit dem IBF und dem IfMB Kernbohrungen ausgewertet sowie Wasserschluckversuche zur Prognose der zu erwartenden Umläufigkeit durchgeführt werden. Als kritisch stellten sich eine den massiven Riffkalkfelsen horizontal durchlaufende Schicht aus Gesteinstrümmern und Tonmergel („Brekzie“) sowie Bereiche kollabierten Kalkgesteins mit jeweils ca. 1 m Mächtigkeit dar. Monitoringkonzepte sowie mögliche Maßnahmen gegen Umläufigkeiten (Felsinjektion, Nachverpressung) wurden gemeinsam mit den indonesischen Partnern entwickelt. [8]

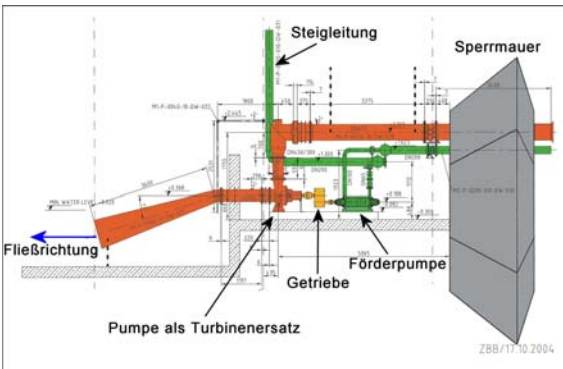
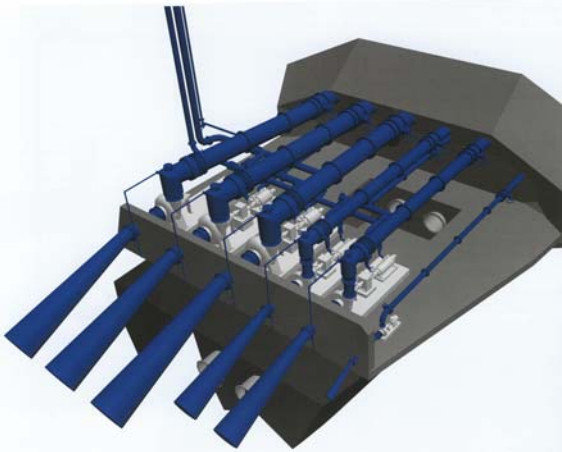


Abb. 10: Modular aufgebaute Wasserförderanlage (Planungszustand; untere Abbildung ohne Grundablassrohre)

Die Dimensionierung der Förderanlage erfolgte unter Berücksichtigung der in Gua Bribin gegebenen hydrologischen und geodätischen Randbedingungen. In Zusammenarbeit mit dem Pumpenhersteller KSB AG wurden Standardmaschinen als Systemkomponenten ausgewählt. Der optimale Wirkungsgrad der Gesamtanlage soll über parallelen Betrieb von maximal 5 Modulen, jeweils bestehend aus PAT, Getriebe und Förderpumpe, erreicht werden. Hierbei sind zwei Modultypen mit unterschiedlichem Schluckvermögen bzw. Förderleistungen vorgesehen. Hinzukommt eine kleineres Aggregat, welches mit einer Leistung von ca. 5 kW einen Drehstrom-Synchrongenerator zur Eigenstromversorgung der Anlage (Inselbetrieb) antreibt. Die elektrische Energie wird u. a. zur Versorgung des Steuerungssystems für die Schieberarmaturen von Modulen und Hochwasserentlastungsrohren (Absperklappe DN800, Ringkolbenventil DN600/700 der Fa. VAG) genutzt (Abbildung 10, 11).



Abb. 11: Endabnahme der Grundablassarmatur (Ringkolbenventil) im VAG-Werk Mannheim (2006)

Die genaue Konstellation der Fördermodule wird erst nach einem Testeinstau zur Ermittlung der möglichen Einstauhöhe festgelegt. Zunächst wurde ein Modultyp bestehend aus einer Spiralgehäusepumpe (als PAT), einem Getriebe und einer 9-stufigen Gliederpumpe auf einem Prüffeld der KSB AG getestet und optimiert (Abbildung 12).



Abb. 12: Fördermodul (Spiralgehäusepumpe als PAT, Stirnradgetriebe, neunstufige Gliederpumpe) auf dem Prüffeld der KSB AG

Die modifizierte PAT besitzt bei 15 m Fallhöhe ein Schluckvermögen von 375 l/s und einen Wirkungsgrad von 81 %. Somit gibt die Pumpe im Turbinenbetrieb an der Welle rd. 45 kW Leistung ab. Ihre Nenn-drehzahl beträgt 1200 U/min und treibt über das Getriebe (Stirnradgetriebe mit Übersetzungsfaktor 1 zu 1,83) die Förderpumpe an. Diese fördert im Nennpunkt bei ca. 2200 U/min rd. 13,5 l/s in den 220 m höher gelegenen Hochbehälter (Abbildung 13). Mit dem Wirkungsgrad der Förderpumpe von 70 % und des Getriebes von 95 % hat das Fördermodul einen Gesamtwirkungsgrad von 54 %. Dieser hohe Wirkungsgrad wird durch die mechanische Kupplung der Pumpe im Turbinenbetrieb mit der Förderpumpe ermöglicht. Bei der Verwendung von elektrischer

Energie (Pumpe im Turbinenbetrieb: Generator; Förderpumpe: Motor) würde sich ein weitaus geringerer Gesamtwirkungsgrad einstellen.

Die Firma Walcher Wasserkraft GmbH entwickelte das SPS-gestützte Steuerungssystem für den modularen Anlagenbetrieb. Dieses ermöglicht durch Einbindung der Fördermodule in das übergeordnete System der Schaltzentrale (Betriebsgebäude am Schachtkopf) die Überwachung und den automatisierten Betrieb der Anlage. Jedes Fördermodul ver-

fügt über einen Schieber mit elektrischem Stellantrieb zum An- und Abfahren. Somit werden die einzelnen Module in Abhängigkeit von Messgrößensignalen (Stauhöhe, Abfluss und Füllstand des Hochbehälters) automatisiert zu- und abgeschaltet. Hierdurch kann der Betriebspunkt der gesamten Förderanlage optimal an die schwankenden hydraulischen Randbedingungen (Wasserdargebot und Wasserbedarf) angepasst werden.

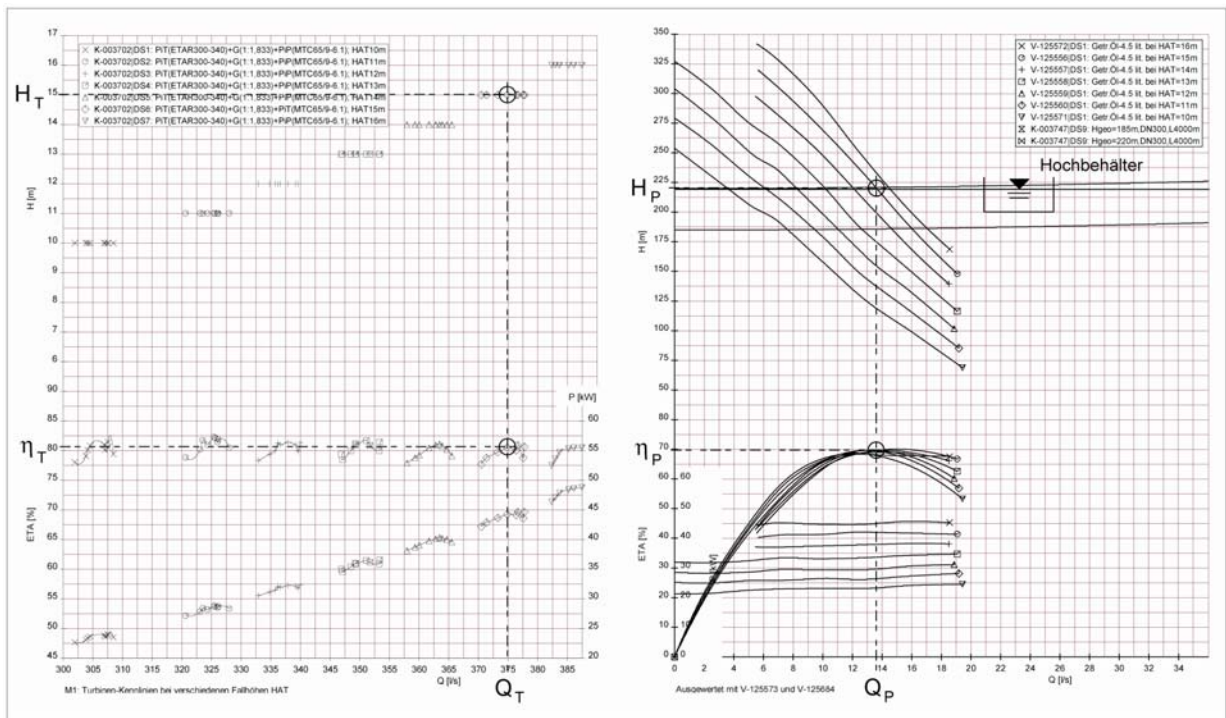


Abb. 13: Kennlinien des Fördermoduls für Fallhöhen von 10 bis 16 m. Links: Turbinenkennlinie der PAT. Rechts: Pumpenkennlinie der Förderpumpe. Beispielhaft ist jeweils der Betriebspunkt für 15 m Fallhöhe (Planungszustand) hervorgehoben (Quelle: KSB AG)

5.4 Beginn der Bauausführung unter Tage

Nach Fertigstellung des Zugangsschachtes im Dezember 2004 konnte am Ende der Regenzeit im April 2005 mit den Ausbaurbeiten in der Höhle begonnen werden. Auf einer Plattform aus Bambus wurde mit Felsausbrucharbeiten und Ankerbohrungen begonnen. Als problematisch stellte sich die Abtragung der stark konsolidierten Schlamm- und Kalzitablagerungen mittels Druckluftanlagen und Saugpumpen an der Gewässersohle heraus, um die Aufstandsfläche für die Wasserhaltungsdämme vorzubereiten. Die bautechnische Realisierung der Wasserhaltung unter Einsatz eines speziellen Verfahrens für Unterwasserbeton ist in Teil 2 des Beitrags dargelegt. [7]

Mitte August war die Baugrube zum ersten Mal wasserfrei. Segmentweise wurden die Hochwasserentlastungsrohre (DN800; DN700/900) von jeweils 18,6 m Länge eingebracht, durch die während der

Bauphase das anströmende Wasser geleitet werden sollte. Nun wurden die Bauarbeiten im Mehrschichtbetrieb Tag und Nacht vorangetrieben. Über 250 m³ Gestein wurden zur Aufweitung der Kaverne und im Bereich des Felswiderlagers mittels Pressluftmeißeln ausgebrochen, weitere 150 m³ an Schlamm- und Geröllablagerungen abgebaut und an die Oberfläche gefördert. Insgesamt wurden 310 Felsankerbohrungen durchgeführt, das Fundament für die Plattform geschüttet, Drainageleitungen verlegt, Bewehrungen vorbereitet. Nach 2-wöchigem Baustillstand während der Ramadan-Feiertage wurden Anfang November die Plattform gegossen sowie die rückwärtige Mauer, welche die Module später während der Regenzeit vor hohen Unterwasserständen schützen soll, errichtet (Abbildung 14).



Abb. 14: Stand der Bauarbeiten Dezember 2005

Anfang Dezember 2005 begann die Regenzeit mit tagelangen Starkniederschlägen unerwartet früh. Am 3. und 11. Dezember 2005 wurde die unterirdische Baustelle durch Hochwasserwellen mit Abflussspitzen von fast 10 m³/s überflutet. Aufgrund des hohen Sicherheitsrisikos wurde in Abstimmung mit den indonesischen Partnern eine Unterbrechung der Arbeiten bis Ende der Regenzeit vereinbart.

5.5 Das Erdbeben im Mai 2006

Kurz nachdem die Arbeiten im Mai 2006 wieder aufgenommen wurden, ereignete sich in der Region Yogyakarta ein katastrophales Erdbebenereignis der Stärke 6,3 (Richterskala). Das Epizentrum lag südöstlich der Stadt Yogyakarta, ca. 30 km von der Höhlenbaustelle entfernt. Es zerstörte über 100.000 Häuser, 6.300 Menschen verloren ihr Leben, über 200.000 Menschen wurden obdachlos.

Zur Zeit des Bebens befanden sich zwei Mitarbeiter des IWG vor Ort und nahmen umgehend Kontakt mit den Karlsruher Kollegen auf. Über persönliche Verbindungen aus dem Projektverbund zu „Komitee Cap Anamur – Deutsche Notärzte e.V.“, war es möglich bereits drei Tage nach der Katastrophe gemeinsam mit einer Hilfsorganisation vor Ort zu sein. Über das bestehende deutsch-indonesische Netzwerk, welches in den letzten Jahren im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes aufgebaut wurde, konnten umgehend Soforthilfemaßnahmen mit den verantwortlichen Partnerinstitutionen der Provinzregierung abgestimmt und zielgerichtet initiiert werden. U. a. wurde durch die Universität Karlsruhe mit Unterstützung des BMBF und Cap Anamur ein Sofortprojekt zum Wiederaufbau einer Schule sowie Sanierung eines Krankenhauses gestartet.

Die Baustelleneinrichtung und der Zugangschacht in Gua Bribin blieben weitestgehend unversehrt. Jedoch stieg nach dem Beben der Wasserstand an der Baustelle um ca. 2 m an, so dass eine Fortführung der Baumaßnahme unmöglich war. Wie sich durch den Einsatz deutscher Berufstaucher im

August 2006 herausstellte, war der Wasserspiegelanstieg auf einen durch das Beben ausgelösten Versturz hinter dem Siphon zurückzuführen. Insgesamt blockierten über 1000 m³ Geröllmassen den Fließquerschnitt. Im Rahmen intensiver Untersuchungen der Höhle Gua Bribin sowie weiterer benachbarter Höhlensysteme konnten keine weiteren Einstürze oder hydrogeologischen Veränderungen nachgewiesen werden. Auch die in den 80er Jahren erstellte unterirdische Wehranlage überstand das Extremereignis vollkommen schadlos.

5.6 Fertigstellung des Sperrwerkes

Ende 2006 wurde in Zusammenarbeit deutscher und indonesischer Spezialisten eine Schneise in den Versturz hinter dem Siphon gesprengt. Eine zweite Sprengkampagne und weitere Freilegung des Fließquerschnittes folgte im April 2007 und führte zu einer entsprechenden Reduzierung des Rückstauinflusses. Im Juni 2007 konnten die Arbeiten zum Höhlenkraftwerk wieder aufgenommen werden. [9]

Im Dezember 2007 wurde das unterirdische Sperrwerk fertig gestellt. Wenige Tage nach Abschluss der Betonierarbeiten ereignete sich ein starkes Hochwasser, dessen Abflussscheitel von ca. 11 m³/s bei einer Druckdifferenz am Sperrwerk von ca. 1,5 mWs über die Grundablassrohre und Mauerdurchlässe schadlos abgeführt werden konnte (Abbildung 15).

Eine ausführliche Darlegung zur bautechnologischen Konzeption und Realisierung des Sperrwerkes findet sich in Teil 2 dieses Beitrages. [7]



Abb. 15: Partieller Einstau des Sperrwerkes während eines Hochwasserereignisses wenige Tage nach Abschluss der Betonierarbeiten

5.7 Installation der Fördermodule und Inbetriebnahme

Mit der Installation des ersten Fördermoduls, des Moduls zur Eigenstromversorgung sowie der Grundablassarmaturen und des SPS-gestützten Steue-

nungssystem (entwickelt in Zusammenarbeit mit der Firma Walcher GmbH) wurde direkt nach Fertigstellung des Sperrwerkes begonnen (Abbildung 16). Der Probeeinstau soll im April 2008 stattfinden. Im Anschluss daran erfolgt die Festlegung und Fertigung der weiteren Fördermodule. Die vollständige Inbetriebnahme des Höhlenkraftwerkes soll bis Ende 2008 erfolgen.



Abb. 16: Installiertes KSB-Fördermodul

6 Ausblick

Das laufende Projekt konzentriert sich auf angepasste Technologien zur Wasserförderung. Seit etwa einem Jahr laufen in Zusammenarbeit der Universität Karlsruhe und dem Forschungszentrum Karlsruhe im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) Vorbereitungen zu einem weiteren mehrjährigen Verbundprojekt in der Region Gunung Kidul. Hierbei geht es um den Aufbau eines „Integrierten Wasserressourcen-Managements (IWRM)“, welches neben der Erschließung der Wasservorkommen auch die Aspekte der optimierten Wasserverteilung, der Wasseraufbereitung sowie der Abwasserentsorgung in der ländlichen Gunung Sewu aber auch den urban geprägten Gebieten des angrenzenden Wonosari Plateaus aufgreifen soll [11].

Zur Gewährleistung der Nachhaltigkeit eines IWRM sind die Entwicklungsarbeiten und Umsetzungen der verschiedenen Fachdisziplinen durch einen intensiven Wissenstransfer zu begleiten. Die exemplarische Entwicklung und Umsetzung eines IWRM in einer überschaubaren Modellregion sollte darauf ausgerichtet sein, die Grundlagen für die konzeptionelle und technologische Übertragung der F&E-Arbeiten auf viele weitere Standorte mit ähnlichen Bedarfssituationen zu schaffen und eine möglichst breitgefächerte Multiplikation anzustoßen.

Die Auswahl der Modellregion favorisiert aus geologischer Sicht eine Karstregion. Gunung Kidul ist hierbei keine Ausnahmegegend. Von den Regie-

rungen der Nachbarprovinzen sowie den kleinen Sundainseln Sumba und Timor wurden bereits Anfragen an das Forscherteam aus Karlsruhe bezüglich der Erschließung der dortigen unterirdischen Flüsse gestellt. Erste Untersuchungen wurden bereits durchgeführt.

Die Nutzung von Karstaquiferen zur Trinkwasserversorgung hat aber auch globale Relevanz [2]. In vielen Regionen der Erde (so z.B. in Südchina, Japan, Philippinen, Thailand, Laos und Südamerika) fließen derzeit tausende von Flüssen, wie Bribin oder Seropan, ungenutzt ins Meer, während die Menschen der Regionen unter Wassermangel leiden. Vor allem in Entwicklungs- und Schwellenländern besteht bezüglich angepasster Technologien zur Erkundung und Bewirtschaftung der unterirdischen Wasserressourcen sowie wirksamen Schutzstrategien des vulnerablen Karstwassers ein enormer Handlungsbedarf.

Die Erschließung des unterirdischen Fließgewässersystems in Verbindung mit der gesamtheitlichen Erarbeitung eines IWRM in Gunung Kidul wird einen wichtigen Beitrag zur Lösung weltweit existierender Wasserknappheit in Karstgebieten liefern. Eine Vielzahl an Forschungsergebnissen des IWRM-Projektes werden sich zudem auch auf Gegenden mit nicht verkarstem Untergrund übertragen lassen. Nicht zuletzt wird das Projekt auch die interkulturelle Verständigung fördern, was gerade vor dem Hintergrund der weltpolitischen Situation von existentieller Bedeutung ist.

Weitere aktuelle Informationen finden sich unter: www.hoehlenbewirtschaftung.de

7 Literatur

- [1] Benischke, R. (2000): „Application of Tracer Methods in the Hydrogeologic Investigation of Karst Systems of Gunung Sewu, Yogyakarta Special Province, Indonesia“. Schlussbericht, Institut für Hydrogeologie und Geothermie, Joanneum Research GmbH, Graz
- [2] Bundschuh, P., Lauer, K. (2005): „Unterirdische Karstfließgewässer als Ressource zur Trinkwasserversorgung“. Literaturstudie, Institut für Mineralogie und Geochemie der Universität Karlsruhe (TH)
- [3] Flathe, H., Pfeiffer, D. (1965): „Grundzüge der Morphologie, Geologie und Hydrologie im Karstgebiet Gunung Sewu/Java (Indonesien)“. In: Geologisches Jahrbuch, Band 83, S. 533-562, Hannover
- [4] Meyer, L. (2005): „Entwicklung und Einsatz einer Vertikalbohrmaschine in Indonesien“. In: Glückauf 141 (2005) Nr.1/2 S.58-63
- [5] MacDonald&Partners (1984): „Greater Yogyakarta Groundwater Resources Study, Volume 3, Cave Survey“, Schlussbericht

- [6] MacDonald&Partners (1984): "Greater Yogyakarta Groundwater Resources Study, Volume 2, Hydrology", Schlussbericht
- [7] Müller, H. S., Fenchel, M., Bohner, E., Mutschler, T. (2008): „Bau eines Höhlenkraftwerkes zur Trinkwassergewinnung auf Java, Teil 2: Konzeption und Realisierung des Sperrwerks unter Berücksichtigung örtlich verfügbarer Baustoffe und Technologien“. In: Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, 13. März 2008, Universität Karlsruhe (TH)
- [8] Mutschler, T., Berner, Z. (2005): „Report on Site Inspection of ‚Gua Bribin‘-Project, 14-23 October 2005“. Universität Karlsruhe (TH)
- [9] Mutschler, T., Bohner, E. (2007): „Report on Inspection of ‚Bribin‘-Project and ‚Seropan‘-Project, 5-13 June 2007“. Universität Karlsruhe (TH)
- [10] Nestmann, F., Oberle, P. (2002): „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)
- [11] Oberle, P., Kappler, J., Unger, B. (2005): „Integriertes Wasserressourcen-Management (IWRM) in Gunung Kidul, Java, Indonesien“. Schlussbericht zur Machbarkeitsuntersuchung im Auftrag des BMBF, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe (TH)
- [12] Scholz, U., Unger, B., Lux, T. (2004): „Sozio-ökonomische Analyse potenzieller Wassernutzer in Mitteljava, Indonesien“. Forschungsbericht (unveröffentlicht) im Auftrag des BMBF; Institut für Geographie, Justus-Liebig-Universität Gießen
- [13] Singh, P. (2005): „Optimization of Internal Hydraulics and of System Design for Pumps as Turbines with Field Implementation and Evaluation“. Dissertation, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Universität Karlsruhe (TH)

Anschrift der Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Franz Nestmann
 Dr.-Ing. Peter Oberle
 Dr.-Ing. Muhammad Ikhwan
 Dr.-Ing. Punit Singh

Universität Karlsruhe (TH)
 Institut für Wasser und Gewässerentwicklung
 Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik
 Kaiserstr. 12
 76131 Karlsruhe