

Bau eines Höhlenkraftwerkes zur Trinkwassergewinnung in Karstgebieten – Pilotstudie auf Java, Indonesien

Peter Oberle, Franz Nestmann, Muhammad Ikhwan

Der Beitrag behandelt den aktuellen Sachstand eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Vorhabens 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. 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. Ende 2008 wurde nach mehrjähriger Bauzeit der Probeinstau und erste Test eines Fördermoduls erfolgreich durchgeführt.

This paper describes the current state of a Federal Ministry of Education and Research (BMBF) joint-project in a karst region in Java, Indonesia, which is coordinated by University of Karlsruhe. Due to the karst underground the people suffer from acute water shortage especially during dry season. At the same time there is abundant water flowing through deep underground karst caves and finally reaching the Indian Ocean. The objective of this joint project is to explore the underground water resources in order to assure a water supply to the communities by developing an underground water power plant and pump facility with an application of appropriate technology which are adapted to the needs and abilities of the local people. At the end of 2008, after multi-years construction works, test storage and first operation test of the facility had been successfully carried out.

1 Einführung

Das ca. 1400 km² große Kalksteingebiet an der Südküste der Insel Java wird aufgrund seiner ausgeprägten Kegelkarstformationen als „Gunung Sewu“, das Land der „tausend Hügel“, bezeichnet (Abb. 1). Insbesondere während der Trockenzeit herrscht in der landwirtschaftlich geprägten Gegend ein akuter Wassermangel (Abb. 2). Gleichzeitig existieren jedoch große unterirdische Wasserressourcen (Abb. 3), die bisher weitgehend ungenutzt über ein weitreichendes Höhlensystem in den Indischen Ozean abfließen (MacDonald&Partners 1984). Aufgrund der Rückhaltekapazität des Karstaquifers führen die unterirdischen Flüsse auch in der Trockenzeit eine beträchtliche Abflussmenge. Seit Jahrzehn-

ten wurden von Seiten der indonesischen Regierung große Anstrengungen unternommen, die unterirdischen Wasserströme nutzbar zu machen. Eine nachhaltige Lösung wurde nicht gefunden. Viele Haushalte müssen während der Trockenzeit mit weniger als 10 Liter pro Kopf und Tag auskommen (Scholz, et.al. 2004).

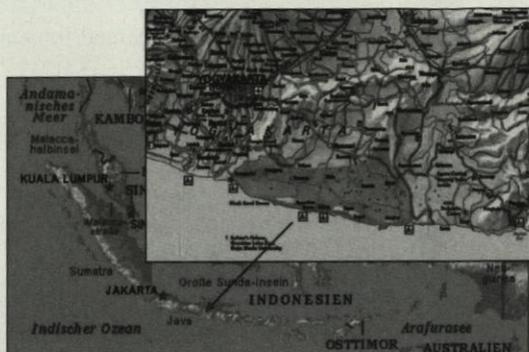


Abbildung 1 Lage des Karstgebietes Gunung Sewu auf der Insel Java, Indonesien

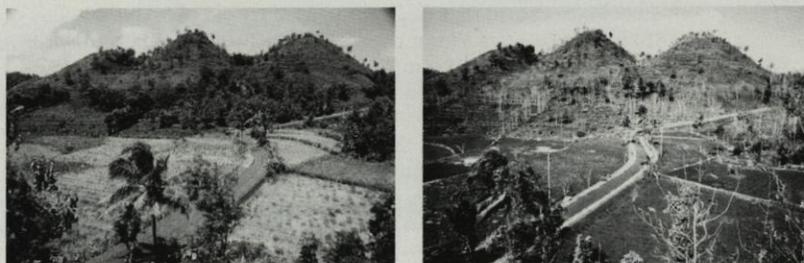


Abbildung 2 Die Karsthügellandschaft in der Regen- und Trockenzeit

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 (Nestmann, et.al. 2002). Ende 2008 wurde an einer Demonstrationsanlage in der Höhle Gua Bribin das erste Wasser über eine Steigleitung in ein 220 m höher gelegenes Verteilerbecken auf einem Karsthügel gefördert. Nach vollständiger Inbetriebnahme sollen 80.000 Menschen in den umliegenden Hütten-siedlungen versorgt werden. Weitere Projekte in angrenzenden Regionen laufen bereits an.



Abbildung 3 Einstieg in das Höhlensystem zur Erkundung der unterirdischen Wasserressourcen

Die Projektumsetzung erfordert eine enge Zusammenarbeit unterschiedlicher Fachdisziplinen sowie ein enges Netzwerk mit indonesischen Partnerinstitutionen. Auf deutscher Seite 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).

2 Rückwärtslaufende Pumpen als angepasste Technologie

Im Rahmen einer Vorstudie wurde folgende Grundkonzeption zur nachhaltigen Nutzung der unterirdischen Wasserressourcen entwickelt (siehe Oberle, et.al. 2006):

Durch ein Sperrwerk, über welches der Höhlenquerschnitt komplett geschlossen werden kann, wird das kontinuierlich zuströmende Wasser aufgestaut und die notwendige Druckhöhe erzeugt, um einen Teil des Abflusses über ein wasser-kraftbetriebenes Pumpsystem an die Oberfläche zu fördern.

Anstelle von Turbinen wurde 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 in Zusammenarbeit mit KSB AG eine umfassende Studie durchgeführt (Abb. 4, Singh 2005).

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 u.U. größenmäßig 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.

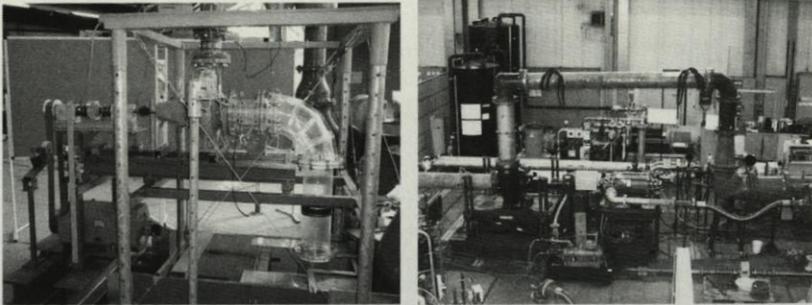


Abbildung 4 Links: Teststand zur Optimierung von Pumpen im Turbinenbetrieb am Theodor-Rehbock-Wasserbaulaboratorium des IWG (Singh 2005); Rechts: Fördermodul (Spiralgehäusepumpe als PAT, Stirnradgetriebe, neunstufige Gliederpumpe) auf dem Prüffeld der KSB AG (2005)

3 Pilotprojekt Gua Bribin

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

Der durchflossene Höhlenstrang hat eine Gesamtlänge von etwa 3 km mit einem Gesamtvolumen von ca. 300.000 m³. Während der Trockenzeit betragen die Abflussmengen zumeist über 1,0 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 hier eine Breite von 10 m und eine Höhe von 6 m. Das Sperrwerk soll das natürliche Gefälle der Höhle ausnutzen und das Wasser des

Kali Bribin auf ein Niveau von ca. 15 m über den Wasserstand des Höhlensees aufstauen (Abb. 5, 6).

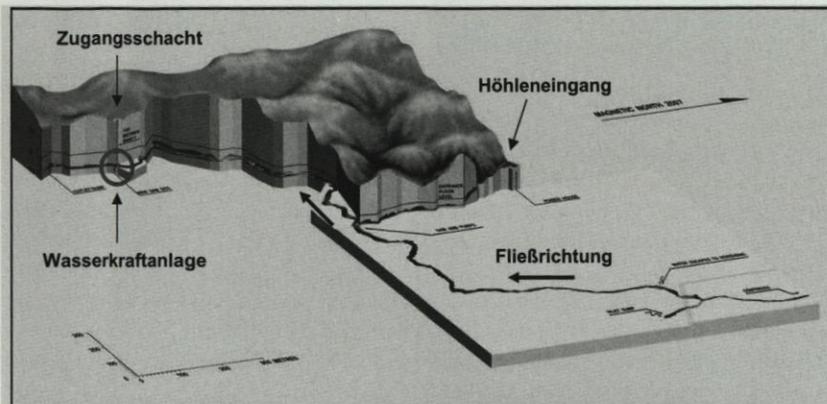


Abbildung 5 3D-Darstellung der Höhle Gua Bribin

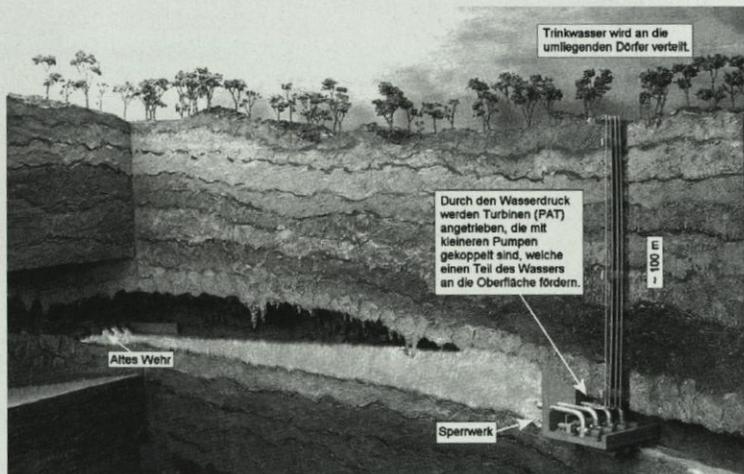


Abbildung 6 Prinzipskizze der unterirdischen Wasserförderanlage

Der Bemessungsabfluss der Gesamtanlage liegt bei ca. $2 \text{ m}^3/\text{s}$. Unter Vollauslastung soll 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

den Betrieb können somit 80.000 Bewohner mit 70 Liter pro Kopf und Tag (lpcd) versorgt werden.

3.1 Anlagenplanung

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 5 Modulen, jeweils bestehend aus PAT, Getriebe und Förderpumpe, erreicht werden (Abb. 7). Hinzukommt eine kleineres Aggregat, welches mit einer Leistung von ca. 10 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.

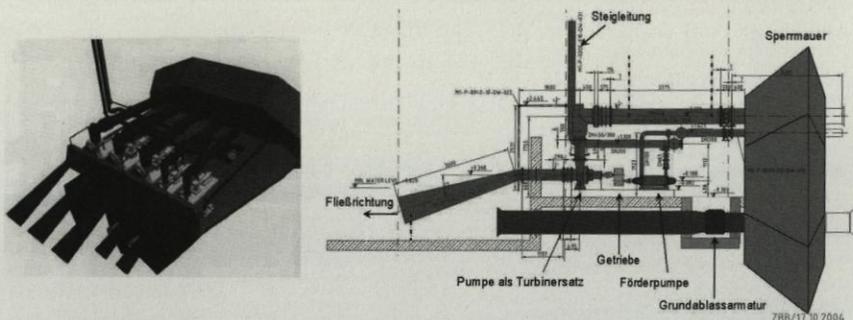


Abbildung 7 Modular aufgebaute Wasserförderanlage (Planungszustand)

Die genaue Konstellation der Fördermodule wurde 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 (Abb. 4).

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 Nenndrehzahl 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. Mit dem Wirkungsgrad der Förderpumpe von 70 % und des Getriebes von 95 % hat das Fördermodul einen Gesamtwirkungsgrad von 54 %.

Die Firma Walcher Wasserkraft GmbH entwickelte das SPS-gestützte Steuerungssystem für den modularen Anlagenbetrieb. Diese erfüllt im wesentlichen folgende Aufgaben:

- Erfassung der Signale der Sensoren:
 - Pegelerfassung (Ober- / Unterwasserstand) mit Drucksensoren und Schwimmerschaltern
 - Drehzahlerfassung der Turbinen mit induktivem Abstandssensor und Lochblende.
- Ausgabe von Stellsignalen für die Absperr- bzw. Drosselarmaturen:
 - 5 Absperrklappen der PAT-Fördermodule
 - 2 Armaturen der Grundablässe
 - 1 Absperrklappe der PAT mit Synchrongenerator (Eigenstromversorgung)

Über die SPS wird durch Zu- bzw. Abschalten einzelner Fördermodule das Stauziel auf 15 m Wasserhöhe geregelt. Übersteigt der Zufluss in den Stauraum das Schluckvermögen der Gesamtanlage wird zunächst über das Ringkolbenventil (RKV) des Grundablasses entlastet. Durch gezielte Feinjustierung des RKV können bei einem Staudruck von 15 m Abflussmengen zwischen 0 und max. 2,5 m³/s abgeführt werden. Die Absperrklappe des zweiten Grundablassrohres mit einer Abflussleistung von 6,0 m³/s dient lediglich zur Hochwasserentlastung.

Sollte bei extremen Abflussspitzen während der Regenzeit der Unterwasserstand einen kritischen Wert übersteigen und die Gefahr einer Flutung der Plattform bestehen, wird durch Zufahren der Grundablassarmaturen der Durchfluss gedrosselt. Dies führt zu einer weiteren Erhöhung des Stauspiegels vor dem Sperrwerk. Nach bisherigen Kenntnissen durchlaufen Hochwasserwellen das unterirdische System innerhalb weniger Stunden, sodass das in der Höhle verfügbare Retentionsvolumen ausreichen sollte, um den Wellenscheitel abzufangen. Erst bei einer (unwahrscheinlichen) Erhöhung des Stauwasserspiegels auf den für die Statik der Stauanlage kritischen Bemessungswert von 30 m werden die Grundablässe und alle Module wieder voll geöffnet und eine Flutung der technischen Anlage in Kauf genommen. Der Schaltschrank befindet sich in überflutungssicherer Höhe im Fahrstuhlschacht, sodass die durch Überflutung entstehenden Schäden sehr begrenzt blieben.

Die Eigenstromversorgung der kompletten Anlage übernimmt ein PAT-betriebener selbstregelnder 10kW-Synchrongenerator. Die Regelung hält über im Unterwasser platzierte Belastungswiderstände die Drehzahl des Generators konstant auf 1500 U/min. Außerdem lädt der Generator die 24V – Notstrombatterien, die bei Ausfall des Generators über einen Frequenzwandler die Absperrschieber und die SPS solange mit Strom versorgen, bis die Anlage in eine sichere Position gefahren ist.

3.2 Bau des Zugangsschachtes

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. 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 (Meyer 2005).

Mit den Bohrarbeiten wurde im Juli 2004 begonnen. Die Bohrarbeiten wurden von der Firma Herrenknecht zusammen mit der indonesischen Baufirma PT Wijaya Karya durchgeführt (Abb. 8). Der Schachtdurchbruch in die Höhle erfolgte im Dezember 2004 bei einer Abteuftiefe von 98,5 m.

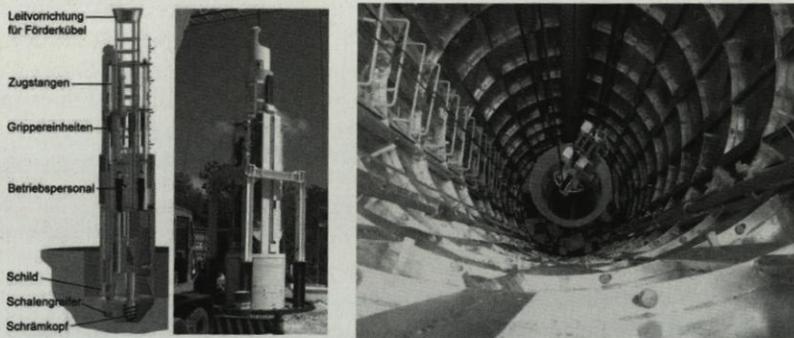


Abbildung 8 Schachtabsenkanlage der Herrenknecht AG und Blick in den Zugangsschacht

3.3 Wasserhaltung und Vorbereitung des Felswiderlagers

Nach Fertigstellung des Zugangsschachtes 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 Druckluftlanzen und Saugpumpen an der Gewässersohle heraus, um die Aufstandsfläche für die Wasserhaltungsdämme vorzubereiten (siehe Müller et.al. 2008).

Mitte August 2005 war die Baugrube zum ersten Mal wasserfrei. Segmentweise wurden die Hochwasserentlastungsrohre (DN800; DN600/900) von jeweils 18,6 m Länge eingebracht, durch die während der Bauphase das anströmende Wasser geleitet werden sollte. 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 (Abb. 9).

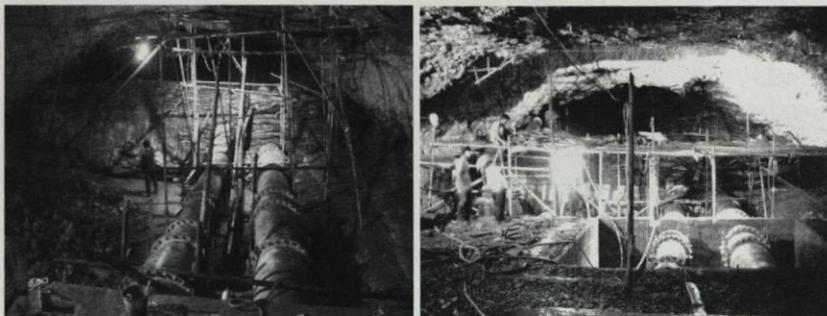


Abbildung 9 Stand der Bauarbeiten Ende 2005

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.

3.4 Auswirkungen des schweren Erdbebens 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 süd-östlich 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 (siehe Nestmann, et.al. 2008).

Die Baustelleneinrichtung und der Zugangsschacht 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 eine in den 80er Jahren erstellte unterirdische Wehranlage überstand das Extremereignis vollkommen schadlos.

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.



Abbildung 10 Felssturz hinter Siphonstrecke (links) und Verlegung des Sprengmaterials (rechts)

3.5 Errichtung des Sperrwerkes

Mit der Fertigstellung des Zugangsschachtes (Dezember 2004) war es möglich, das Gebirge im Bereich des Absperrbauwerkes weiter zu untersuchen (Mutschler, et.al. 2005). Hierzu wurde vom IBF und IMG eine geologisch/geotechnische Oberflächenkartierung der Sperrenstellen erstellt. Das Gebirge wird in die vier Homogenbereiche; HA1: massiger, gebankter Kalkstein, HA2: kavernöser Riffkalk, HA3: kollabierter kavernöser Riffkalk und HA4: brekziöser Kalkstein in einer weichen Tonmatrix unterteilt (Abb. 11)..

Zur Verbesserung der Gründungssituation der Sperrmauer wurden insgesamt 42 Mikropfähle in einem mittleren Abstand von 0,7 m und einer Tiefe von 4 m eingebracht. Zudem wurden zur Verbesserung der Widerlagersituation und zur Senkung des Risikos eines hydraulischen Durchbruchs rechts- und linksseitig im Bereich der Brekzie die Einbindetiefe des Widerlagers lokal um 1.4 m vergrößert.

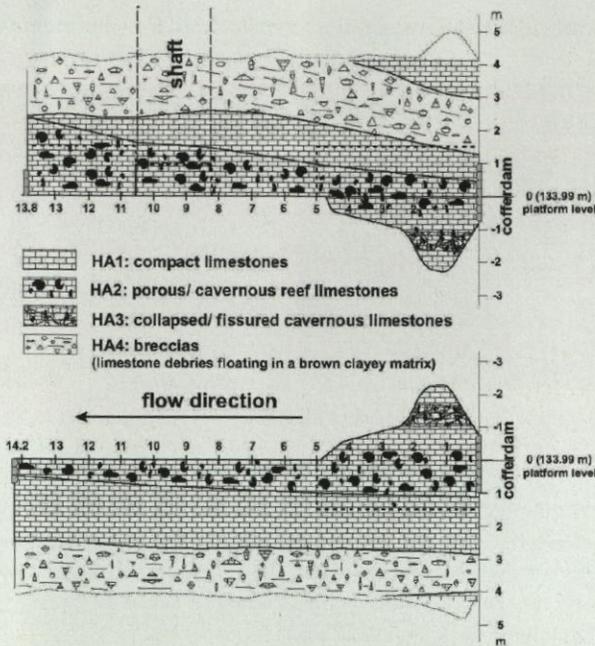


Abbildung 11 Ergebnis der Oberflächenkartierung (Mutschler, et.al. 2005)

Die Herstellung der monolithischen Sperrmauer erfolgte vom Fuß bis zum oberen Abschluss in insgesamt sechs Abschnitten, die jeweils in einem Abstand von mehreren Tagen geschalt, bewehrt und betoniert wurden. Im Bereich der horizontalen Fugen zwischen den einzelnen Betonierabschnitten wurden Fugenbänder eingebaut.

Der Transport des Betons in der Höhle erfolgte für die ersten drei Betonierabschnitte mit Hilfe eines verzweigten Systems von Rinnen, die jeweils bis zu mehrere Meter lang waren. Der Beton wurde zuvor in einem ca. 2 m³ großen Krankübel durch den vertikalen Schacht transportiert und am Schachtfuß direkt auf die Rinnen geleert. Für den vierten Betonierabschnitt wurden anstelle der Rinnen Förderbänder zur Zuführung des Betons eingesetzt. Das Niveau des 5. Betonierabschnitts lag bereits so hoch, dass nur von der Wasserseite der Sperrmauer betoniert werden konnte. Hierfür wurde der Beton über eine Schüttrinne durch die Revisionsöffnung („Mannloch“) transportiert und händisch mit Eimern eingebaut. Der oberste Abschnitt der Sperrmauer konnte nicht wie die übrigen Abschnitte aus Ortbeton hergestellt werden, da die anstehende Höhlendecke den Betoneinbau behinderte. Da aus Platzgründen auch keine Betonpumpe

eingesetzt werden konnte, wurde der oberste Mauerabschnitt mit Spritzbeton hergestellt.



Abbildung 12 Links: Bau der Sperrmauer - Bewehrung & Mauerdurchlässe; Rechts: System aus verzweigten Rinnen zum Transport des Frischbetons vom Schachtfuß in die Schalung

Zur aktiven Kühlung des Betons wurde ein System aus Kühlrohren in der Schalung montiert (Abb. 12). Die Rohre wurden mit Beginn des Betoneinbaus für mehrere Tage mit Wasser durchströmt. Die Temperaturdifferenzen zwischen Vor- und Rücklauf wurden gemessen und lieferten somit Hinweise zum Verlauf der Betonhydratation.

Hinsichtlich der Dichtheit des Sperrwerkes spielen die Rohrdurchführungen und die Kontaktzonen zwischen Beton und Fels eine bedeutende Rolle. In diesen Bereichen wurden Injektionsschläuche vorgesehen, die ein Nachverpressen der Kontaktstellen bzw. eine spätere Abdichtung evtl. auftretender Leckagen ermöglichen (Mutschler, et.al. 2007).

Im Januar 2008 wurde das unterirdische Sperrwerk fertig gestellt. Im Juli 2008 wurde die Kontaktinjektion zwischen dem Sperrwerk und Fels durchgeführt (Abb. 14). Eine ausführliche Darlegung zur bautechnologischen Konzeption und Realisierung des Sperrwerkes findet sich in Müller, et.al. 2008.

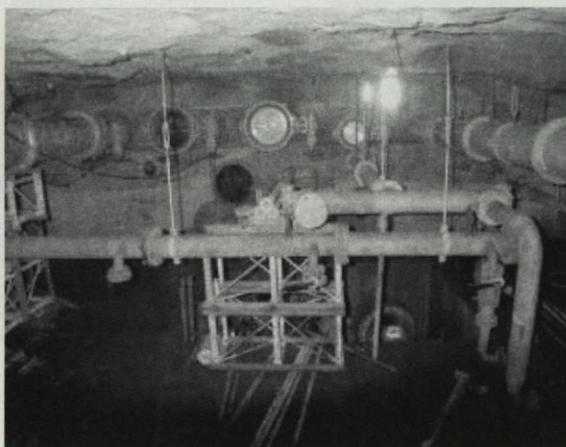


Abbildung 13 Fertiggestellte Mauer mit Durchlässen, Schieberkammer und Rohrsystem des Fördermoduls



Abbildung 14 Injektionsmaßnahme zum Nachverpressen der Kontaktzone zwischen Betonkörper und Fels im Juli 2008

3.6 Installation der Fördermodule und Inbetriebnahme

Mit der Installation des ersten KSB-Fördermoduls sowie des Moduls zur Eigenstromversorgung wurde direkt nach Fertigstellung des Sperrwerkes begonnen (Abb. 15). Zum Einbringen der VAG-Grundablassarmaturen wurden am Ende der Regenzeit die durchströmten Grundablässe kurzzeitig über Rohr-Dichtkissen ober- und unterwasserseitig abgedichtet und der Gesamtabfluss über das jeweils verbleibende offene Rohr abgeführt. Die Gesamtabflussleistung der Grundablässe beträgt $10 \text{ m}^3/\text{s}$ (Maximalwert der beobachteten Hochwasserscheitel) bei einer Druckdifferenz von 20 m. Ein Rechenkorb im Bereich der Einlauftrichter hält mögliches Treibgut (ggf. im Oberwasser versenktes Baumaterial) zurück. Die Statik der Sperrmauer wurde auf eine Einstauhöhe von max. 30 m ausgelegt.

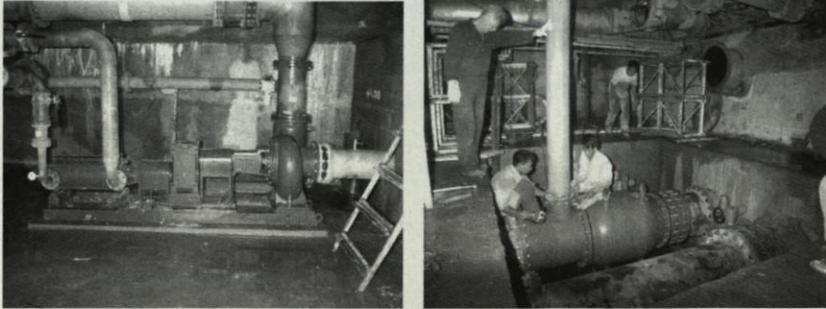


Abbildung 15 Links: Installiertes erstes KSB-Fördermodul (ETA-R 300-340, Stirnradgetriebe und MTC D 65/9 6.1) , Rechts: Installiertes VAG-Grundablassarmaturen (Absperklappe DN800 und Ringkolbenventil DN600/700)

Im August 2008 wurde unter großer Anteilnahme der Öffentlichkeit und indonesischen Partnerinstitutionen der erste Probeeinstaus bei einem Abfluss von $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ durchgeführt. Aufgrund der Annahme, dass während der Einstauphase zunächst eine Sättigung des anstehenden Gebirge erfolgt (abgesehen vom Restrisiko von Verlusten über unentdeckte Klüfte im Karstgefüge), wurde mit einer Einstaudauer von mindestens 1-2 Wochen gerechnet. Jedoch wurde bereits in weniger als 2 Tagen eine Einstauhöhe von 16 m erreicht. Die kurze Einstauzeit übertraf alle Erwartungen. Über Teilöffnung der Grundablässe wurde das Stauziel über mehrere Tage auf konstantem Niveau gehalten. Die Volumenbilanzierung ergab keinerlei Hinweise auf Wasserverluste innerhalb des Stauraumes.

Luftseitig des Sperrwerks wurden im Hangenden Drainagebohrungen vorgesehen. Diese dienen der Abführung des sich aufbauenden Druckwassers in der Höhlendecke über der Plattform. Zum Zeitpunkt des Probeeinstaus war der von deutscher Seite empfohlene Injektionsschleier zur Reduktion von Umläufigkeiten (Mutschler, et.al. 2005) noch nicht realisiert. Dennoch betrug die beobachtete Sickerwassermenge weniger als 750 l/h. Ein Austrag von Feinpartikeln wurde nicht beobachtet.

Während des Probeeinstaus wurde auch das vorhandene Pumpenmodul testweise in Betrieb genommen (Abb. 16). Die Förderleistung über das 100 m lange vertikale Steigrohr zum Schachtkopf entsprach erwartungsgemäß mit 20 l/s den Kennlinien der Laborversuche.



Abbildung 16 Links: Erfolgreicher erster Testeinstau und Inbetriebnahme; Rechts: Verteilspeicher Kaligoro

Bis Oktober 2008 waren schließlich auch die Arbeiten an der 3,5 km langen Zubringerleitung zum 220 m über Stauziel liegenden Verteilspeicher Kaligoro abgeschlossen (Abb. 16). So konnten weitere umfassende Testreihen des Fördersystems durchgeführt werden, die die Funktionsfähigkeit des Förderprinzips und den angestrebten hohen Wirkungsgrad bestätigten. Im Rahmen der Versuchsreihe wurden sogar Einstauhöhen am Sperrwerk von bis zu $z = 20$ m (Abb. 16) erreicht. Die begleitenden hochpräzisen Konvergenzmessungen ergaben selbst bei dieser Druckhöhe keine nachweisbaren Bewegungen des Sperrwerkes bzw. Felswiderlagers. Allerdings stieg die über die Drainagen abgeführte Sickerwassermenge auf 1400 l/h an. Ende Januar 2009 wurde die Testreihe zur Realisierung des Injektionsschleiers (voraussichtlich im März 2009) durchgeführt.

Zudem wurde die Installation des in Zusammenarbeit mit der Fa. Walcher (Fulda) entwickelten SPS-gestützten Steuerungssystems vorgenommen. Auf Basis der Ergebnisse des Probeeinstaus erfolgt derzeit die Fertigung von 4 weiteren KSB-Fördermodulen. Die vollständige Inbetriebnahme des Höhlenkraftwerkes soll bis Juni 2009 erfolgen.

4 Ausblick

Das Projekt in Gua Bribin 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 „Integrierten Wasserressourcen-Managements (IWRM)“. Hierbei wird u.a. als Alternative zum Sperrwerksbau in Gua Bribin die Wasserkraftnutzung über eine unterirdische Druckrohrleitung aus Holz erprobt. Neben der Erschließung der Wasservorkommen werden auch Aspekte der optimierten Wasserverteilung, der Was-

seraufbereitung sowie der Abwasserentsorgung in der ländlichen Gunung Sewu aber auch den urban geprägten Gebieten des angrenzenden Wonosari Plateaus aufgegriffen (Oberle, et.al. 2005).

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.

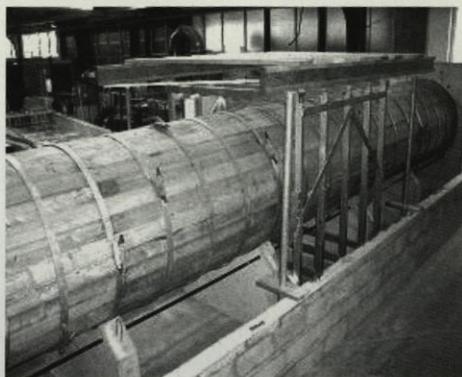


Abbildung 17 Links: Versuchsstand zur Holzdruckrohrleitung an der Universität Karlsruhe; Rechts: Wasserfall in der Höhle Gua Seropan; hier ist der Bau einer Wasserkraftanlage mit Holzdruckrohrleitung geplant

Die Auswahl der Modellregion favorisiert aus geologischer Sicht eine Karstregion. Gunung Kidul ist hierbei keine Ausnahmegegend. Von den Regierungen 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 (Bundschuh, et.al. 2005). 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; www.iwrm-indonesien.de

5 Literatur

- 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
- Bundschuh, P. und Lauer, K. (2005): „Unterirdische Karstfließgewässer als Ressource zur Trinkwasserversorgung“. Literaturstudie, Institut für Mineralogie und Geochemie der Universität Karlsruhe (TH)
- Fellmoser, P. (2007): „Druckrohrleitungen aus Holz – Anwendung und Bemessung“, Karlsruher Berichte zum Ingeieurholzbau, Universitätsverlag Karlsruhe, Band 9.
- MacDonald&Partners (1984): „Greater Yogyakarta Groundwater Resources Study, Volume 3, Cave Survey“, Schlussbericht
- MacDonald&Partners (1984): „Greater Yogyakarta Groundwater Resources Study, Volume 2, Hydrology“, Schlussbericht
- Meyer, L. (2005): „Entwicklung und Einsatz einer Vertikalbohrmaschine in Indonesien“. In: Glückauf 141 (2005) Nr.1/2 S.58–63
- Müller, H. S., Fenchel, M., Bohner, E., Mutschler, T. (2008): „Bau eines Höhlenkraftwerkes zur Trinkwassergewinnung auf Java, Teil 2: Konzeption und Realisierung des Sperrwerkes unter Berücksichtigung örtlich verfügbarer Baustoffe und Technologien“. In: Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, 13. März 2008, Universität Karlsruhe (TH)
- Mutschler, T., Berner, Z. (2005): „Report on Site Inspection of ‚Gua Bribin‘-Project, 14-23 October 2005“. Universität Karlsruhe (TH)
- Mutschler, T., Bohner, E. (2007): „Report on Inspection of ‚Bribin‘-Project and ‚Seropan‘-Project, 5-13 June 2007“. Universität Karlsruhe (TH)

- Nestmann, F. und 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)
- Nestmann, F., Oberle, P., Ikhwan, M., Singh, P. (2008): „Bau eines Höhlenkraftwerkes zur Trinkwassergewinnung auf Java, Teil Gesamtkonzept zur energetischen Nutzung unterirdischer Wasserressourcen in Karstgebieten“, Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, 13. März 2008, Universität Karlsruhe (TH)
- Oberle, P., Kappler, J. und 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)
- Oberle, P., Nestmann, F., (2006), „Höhlenkraftwerk zur Trinkwassergewinnung auf Java“, Fredericana, Zeitschrift der Universität Karlsruhe (TH) heft 66.
- Oberle, P. und Nestmann, F. (2006): „Bau unterirdischer Wasserspeicher in Karstgebieten auf Java“ Wasserbausymposium Graz 2006: Stauhaltungen und Speicher Von der Tradition zur Moderne. TU Graz, Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft, Bd. 46/1, 2006, S. 406 421
- Scholz, U., Unger, B. und Lux, T. (2004): „Sozioökonomische Analyse potenzieller Wassernutzer in Mitteljava, Indonesien“. Forschungsbericht (unveröffentlicht) im Auftrag des BMBF; Institut für Geographie, Justus-Liebig-Universität Gießen
- 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).

Autoren:

Prof. Franz Nestmann Nestmann@iwg.uka.deDr.-Ing. Peter Oberle Oberle@iwg.uka.deDr.-Ing. Muhammad Ikhwan Ikhwan@iwg.uka.de

Institut für Wasser und Gewässerentwicklung

Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik

Universität Karlsruhe (TH)

Kaiserstrasse 12, D-76131 Karlsruhe, Deutschland

Tel.: +49 (0) 721 608-8094

Fax: +49 (0) 721 66 16 34