

(Version 10.03.2006)

Höhlenkraftwerk zur Trinkwassergewinnung auf Java

Franz Nestmann, Peter Oberle

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. Zurückzuführen ist dies vor allem auf die geographische Lage Indonesiens. Das Land liegt in den feuchten Tropen und ist infolgedessen in den meisten Landesteilen durch ausreichende jährliche Niederschlagsmengen gekennzeichnet. 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 (**Abb.1**). Insbesondere während der Trockenzeit herrscht in der landwirtschaftlich geprägten Gegend ein akuter Wassermangel (**Abb.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. 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 zur Zeit ein Lösungsansatz erprobt. Mitte 2006 soll an dieser Demonstrationsanlage das erste Wasser über eine 200 m lange Steigleitung in ein 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* (Prof. Günter Schmitt), das *Institut für Massivbau und Baustofftechnologie* (Prof. Harald S. Müller), das *Institut für Mineralogie und Geochemie* (Prof. Doris Stüben), die *Versuchsanstalt für Stahl, Holz, Steine* (Prof. Hans J. Blass) sowie das *Institut für Boden und Felsmechanik* (Prof. Gerd Gudehus). Weitere Verbundpartner sind das *Institut für Geographie* der Universität Gießen sowie die Industriepartner *Herrenknecht AG* (Tunnelvortriebstechnik), *KSB AG* (Pumpentechnologie) und *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. Schirmherr ist hierbei der Gouverneur *Sri Sultan Hamengku Buwono X* der Sonderprovinz Yogyakarta (**Abb.3**). 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.



Abb.3 Audienz bei Sri Sultan Hamengku Buwono X in Yogyakarta (links) / Treffen mit dem damaligen Umweltminister Müller und Bürgermeister Groh an der Fakultät für Bau-, Geo- und Umweltwissenschaften im Jahr 2003 (rechts)

Gunung Kidul - das Armenhaus Javas

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.

Der Name Gunung Sewu (übersetzt: „tausend Hügel“) ist auf die auffälligen, durch tropische Karsterosion entstandenen Kegelformationen („Kegelparst“) zurückzuführen. Der kompakte Riffkalk-Komplex hat eine Mächtigkeit von einigen hundert Metern und stammt aus dem Zeitalter des Tertiär bis Quartär. Die von Ost nach West verlaufende Gebirgskette ist zwischen 150 und 300 Meter hoch. Im Süden fällt die Karstebene in einer steilen, fast unnahbaren Küste zum Indischen Ozean ab.

Das gesamte Gebiet der Gunung Sewu ist von hunderten, miteinander vernetzten Höhlen durchzogen, welche im Laufe der Jahrhunderttausende 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.

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. Jede Familie besitzt durchschnittlich ein 0,2 ha großes Feld. Darauf bauen sie zu Beginn der Regenzeit Trockenreis, Maniok, Mais und Erdnüsse an. Obwohl jeder Quadratmeter der Karsthügellandschaft landwirtschaftlich genutzt wird sind die Erträge in erster Linie aufgrund fehlender Bewässerungsmöglichkeiten bis heute sehr gering. Neben dem Feld bewirtschaftet die Familie einen Hausgarten, in dem sie Gemüse und Obst zur Eigenversorgung anbaut. Von großer Bedeutung ist auch die Rinderhaltung. Rinder arbeiten als Zugtiere beim Pflügen der Felder, liefern Dünger, dienen als Geldreserve für größere Anschaffungen oder Familienfeste und gelten als Prestigeobjekt. Allerdings verursacht die Rinderhaltung einen erheblichen Ar-

beitsaufwand für die Futtermittellieferung und das Tränken. So trinkt ein Rind durchschnittlich 20 l Wasser pro Tag (**Abb.4**).



Abb.4 Landwirtschaft und Rinderhaltung in der Gunung Sewu

Aufgrund mangelnder Einkommensmöglichkeiten wandern viele jüngere Menschen in die Ballungsräume der Großstädte ab („brain-drain“), wodurch dort die sozialen Probleme verstärkt werden. Auch der Familienvater sucht sich Einkommensmöglichkeiten außerhalb der Landwirtschaft. In der Regel findet er ein Zweiteinkommen in der nahe gelegenen Provinzhauptstadt Yogyakarta.

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 stundenlangender Arbeit mit Kanistern nach Hause getragen. Viele Haushalte müssen während der Trockenzeit mit weniger als 10 Liter pro Kopf und Tag auskommen.

Erster Einstieg in die Unterwelt

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 80-er Jahren durchgeführten interdisziplinären Datenerfassung des britischen Consulting-Büros *Sir MacDonald & Partners* zurückgegriffen werden. Von besonderem Interesse waren die Aufzeichnungen einer 2-jährigen Höhlenerkundung durch 5 britisch-indonesische Expeditionsteams. Insgesamt wurden 160 von damals 246 bekannten Höhlen erkundet. Diese Aufzeichnungen waren für die Auswahl der im Rahmen der Machbarkeitsuntersuchung des IWG zu untersuchenden Höhlen hervorragend geeignet. Sie ersetzen jedoch nicht den eigenen Einstieg in die Unterwelt.

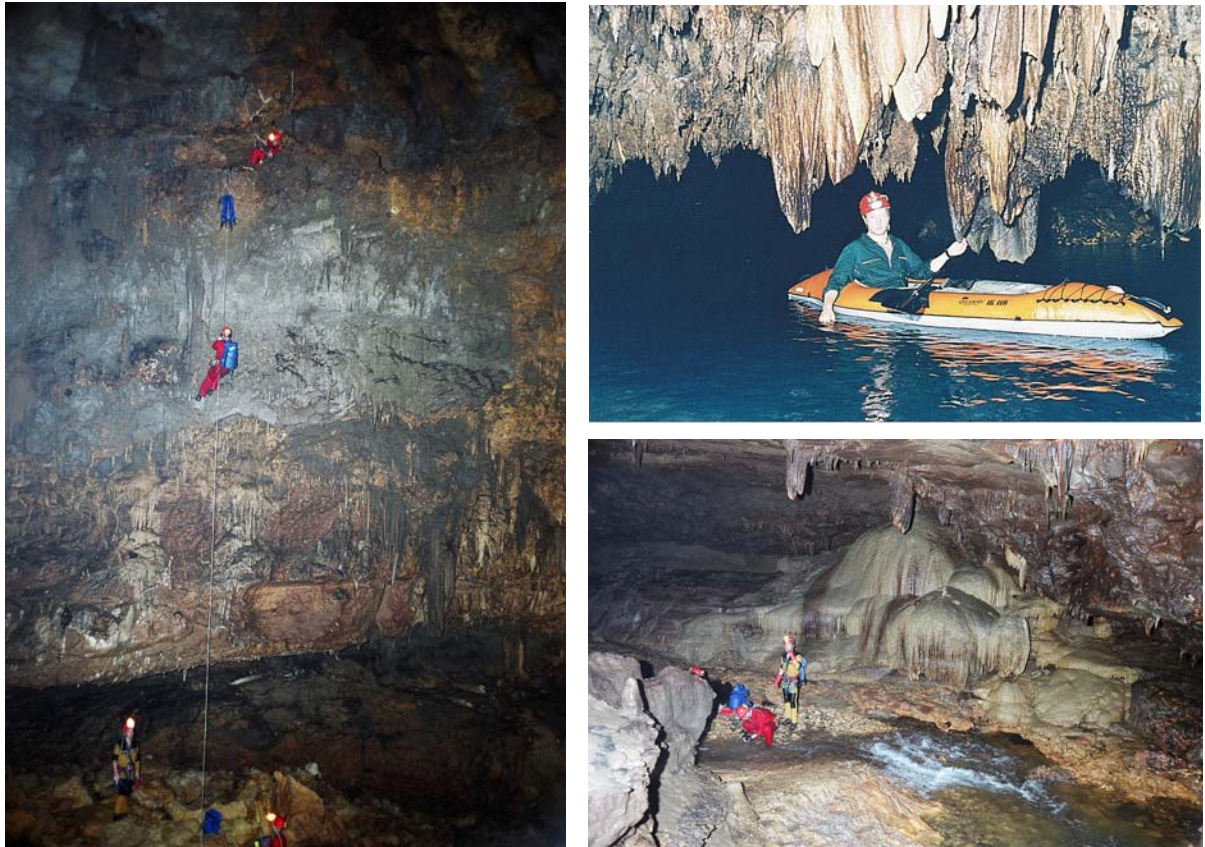


Abb.5 Einstieg in das Höhlensystem zur Erkundung der unterirdischen Wasserressourcen

Die Begehung der Höhlen (im Fachchargon der Speleologen spricht man von „Befahrung“) mit einer Ausdehnung von z.T. mehreren Kilometern gestaltet sich als ein abenteuerliches Unterfangen (**Abb.5**): Der Zugang ist in vielen Fällen nur über einen steilen Schacht („Luwang“) bzw. Dolineneinbruch oder über einen engen Stollen („Gua“) mit einer Querschnittsfläche $< 0,5 \text{ m}^2$ möglich. Der Grundwasserfluss durch die Höhlen verläuft meist mit geringem Gefälle gleichmäßig über einige hundert Meter bis hin zu mehreren Kilometern. Andere Höhlenverläufe sind komplex und treppenförmig mit einer Kaskade von Wasserfällen und Gumpen; auf manchen Streckenabschnitten herrscht Druckabfluss. Die Durchquerung unterirdischer Seen und steiler Fließstrecken und die Überwindung vertikaler Strecken mittels Seilklettertechnik macht eine optimale Ausstattung in Bezug auf Lichtquellen, Kletterausrüstung, Bekleidung und Schwimmhilfen lebenswichtig. Zudem ist besonders im Bereich des Höhleneinganges mit Schlangen und Skorpionen zu rechnen. Im Rahmen der Höhlenvermessung während der Regenzeit 2003 kam es im engen Eingangsstollen zu einer Begegnung mit einer zwei Meter langen King Kobra, welche sofort in Angriffsstellung ging und ihr Gift in Richtung der Vermessungsingenieure spie. Glücklicherweise verlief diese Begegnung glimpflich.

Trotz umfassender Vorbereitung wäre die Erkundung der Höhlensysteme ohne Unterstützung ortskundiger Höhlenforscher unmöglich gewesen. So konnten einige Mitglieder des Acintyacunyata Speleological Club (ASC) Yogyakarta für die Felduntersuchungen gewonnen werden. Sie stellten sich als äußerst engagierte, verantwortungsvolle und zuverlässige Expeditionsteilnehmer heraus. Mittlerweile ist die Nichtregierungsorganisation offizieller Partner im deutsch-indonesischen Kooperationsbündnis.

Rückwärtslaufende Pumpen und Holzrohrleitungen als angepasste Technologie

Im Rahmen der Vorstudie wurden zwei Grundkonzepte zur nachhaltigen Nutzung der unterirdischen Wasserressourcen entwickelt:

Variante 1: Einstau über ein Sperrwerk

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. Je nach geologischen Randbedingungen besteht allerdings das Risiko von Wasserverlusten über Klüfte und Porositäten des Felskörpers.

Um dem Gedanken der „angepassten Technologien“ 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 75%-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 (**Abb.6**). 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 größtmäßig 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.

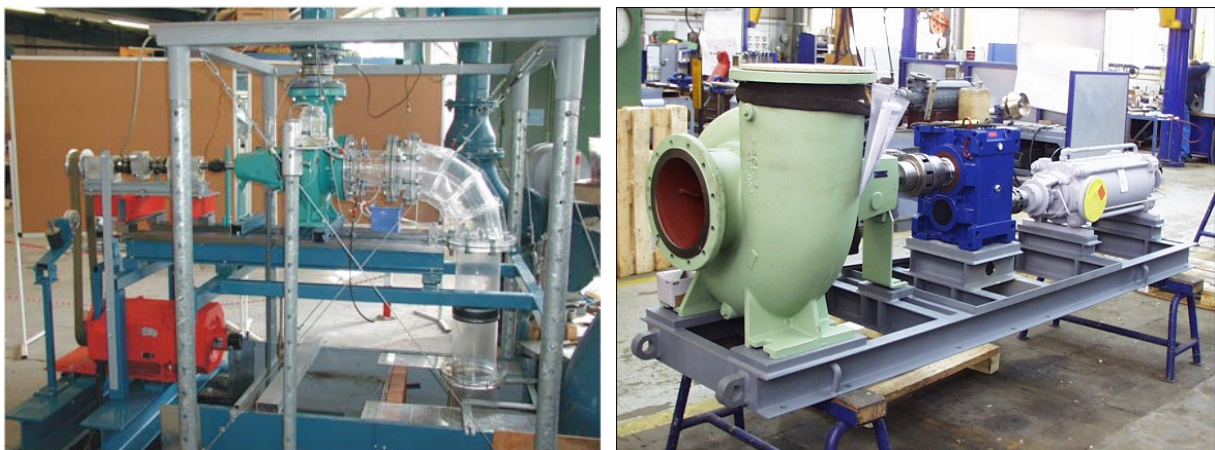


Abb.6 Links: Teststand zur Optimierung von Pumpen im Turbinenbetrieb am Theodor-Rehbock-Wasserbaulaboratorium des IWG

Rechts: Modul 1 (Spiralgehäusepumpe als PAT, Stirnradgetriebe, neunstufige Gliederpumpe) auf dem Prüffeld der KSB AG

Variante 2: Druckrohrleitung aus Holz

Zur Erzeugung der zum Antrieb von Förderpumpen erforderlichen Druckhöhe wird entsprechend dem geodätischen Gefälle des Höhlenverlaufes eine Druckrohrleitung verlegt. Über eine Wasserfassung am oberen Ende der Rohrleitung wird dieser das zuströmende Wasser zugeführt. Diese Ausführungsvariante kann für kurze Strecken mit hohem Gefälle zielführend sein. Sie hat den Nachteil der fehlenden Speicher- bzw. Bewirtschaftungsmöglichkeiten, ist jedoch weitgehend unabhängig von den geologischen Randbedingungen (kein Risiko durch Wasserverluste). Zur Energiegewinnung werden wiederum Pumpen im Turbinenbetrieb eingesetzt.

Aufgrund der Unwegsamkeit und Enge in den Karsthöhlen und den sich daraus ergebenden Schwierigkeiten beim Verlegen der Rohrleitung bietet sich der Baustoff Holz an. Druckrohrleitungen aus Holz bestehen aus einzelnen Bohlen oder Kanthölzern mit Nut- und Federverbindungen, die gegeneinander versetzt und mit Stahlringen zusammengehalten werden. Die Dichtheit der Rohrleitung wird durch das Quellen des Holzes gewährleistet und die stetige Wassersättigung des Holzes verhindert zuverlässig einen Pilzbefall. Die Lebensdauer beträgt zwischen 60 und 100 Jahren.

Anhand experimenteller Untersuchungen wurden im Rahmen des Teilprojektes der Versuchsanstalt Stahl, Holz und Steine der Einfluss der Holzfeuchte auf die physikalischen Eigenschaften ausgewählter indonesischer Holzarten und deren Eignung für den Bau von Holzdruckrohrleitungen untersucht. Zudem werden konstruktive Lösungen z.B. für die Anbindung der Holzdauben an Betonteile entwickelt.



Abb.7 Wasserfall in der Höhle Seropan; hier ist der Bau einer Wasserkraftanlage mit Holzdruckrohrleitung geplant

Gua Bribin - die Laborhöhle

Bezüglich einer pilothaften Umsetzung des ersten Lösungskonzeptes (Sperrwerk) stellte sich die Höhle Gua Bribin als besonders geeignet heraus (**Abb.8**). Über einen ca. 350 m langen engen Zugangsstollen, der stellenweise nur kriechend „befahrbar“ ist, 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. Einziger Zweck des beeindruckenden Bauwerkes ist die Sicherstellung einer ausreichenden Überdeckung der oberhalb der Wehranlage installierten Pumpen, welche über Dieselmotoren 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.9**).

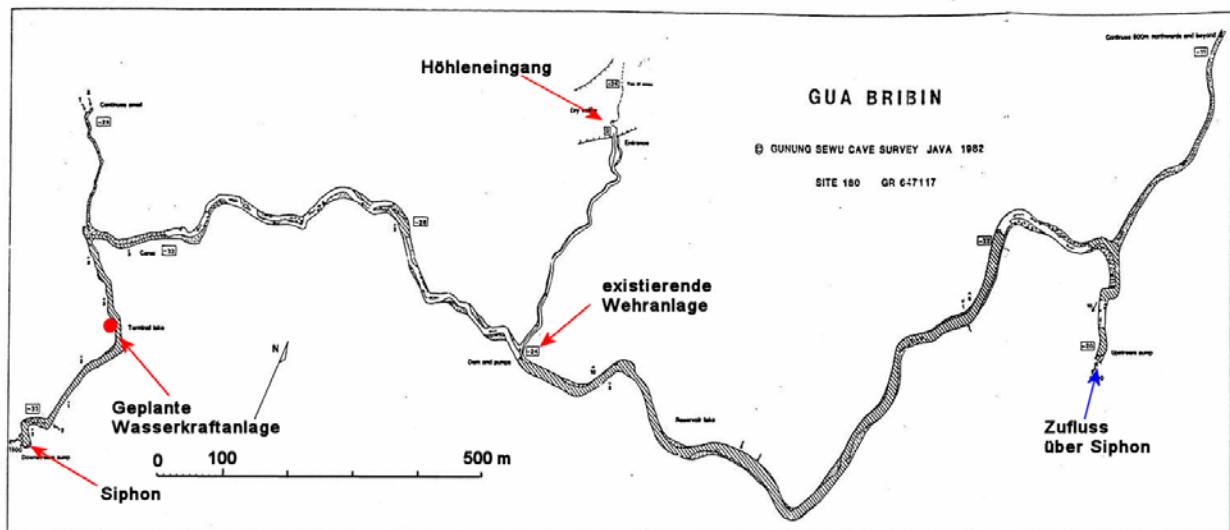


Abb.8 Lageplan der Höhle Gua Bribin



Abb.9 Alte unterirdische Wehranlage mit Radarmesspegel des IWG / Stillgelegte Wasserleitung

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 (**Abb.10**). Der Bemessungsabfluss der Gesamtanlage liegt bei ca. 2 m³/s. Unter Volllastleistung könnte die Anlage genügend mechanische Leistung erzeugen, um pro Sekunde über 65 Liter Wasser in ein ca. 200 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.

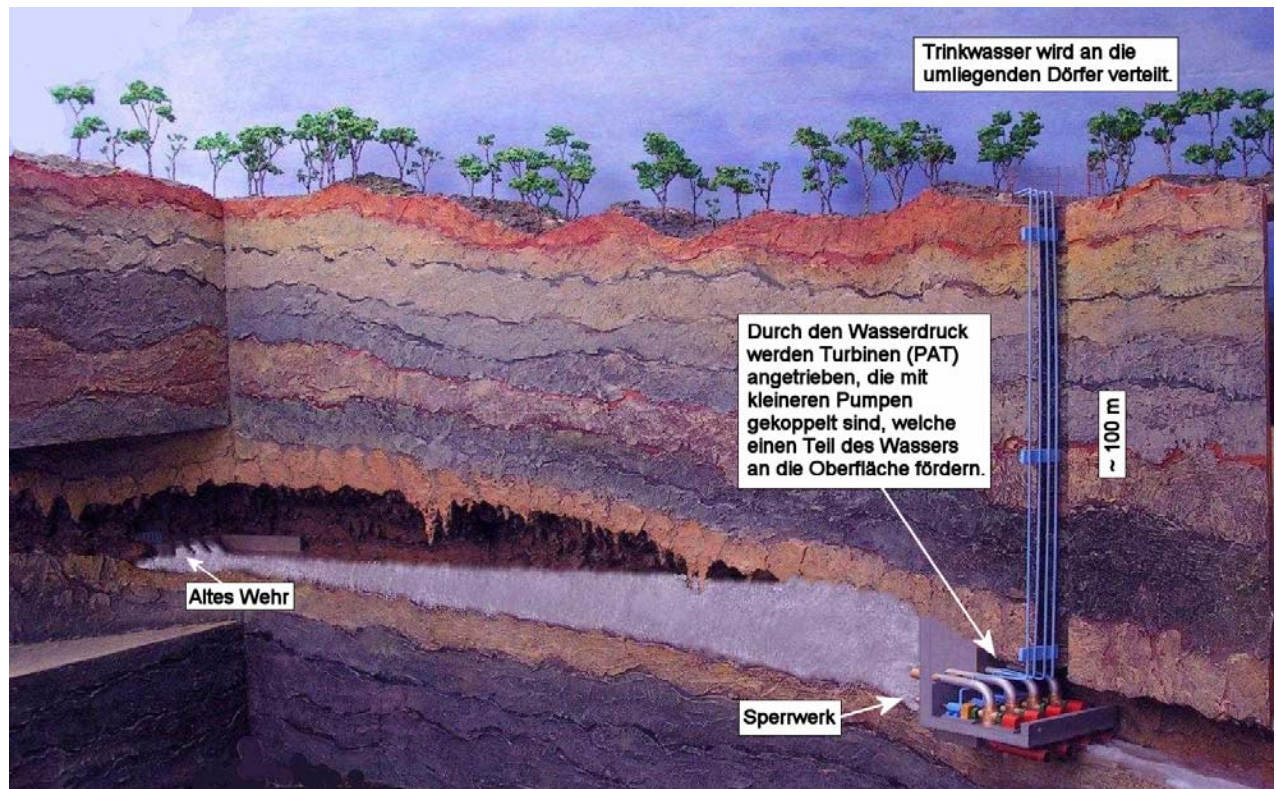


Abb.10 Prinzipskizze der unterirdischen Wasserförderanlage

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 Wassereinbrüche 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. 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 > 1m aufweisen.

Mit hochpräziser Lasertechnik in wilder Karstlandschaft

Für den Ausbau der Höhle war die Errichtung eines vertikalen Zugangsschachtes zum Einbringen von Baumaterialien, Rohrleitungen und Turbinenpumpen sowie die späteren Betriebs- und Wartungsarbeiten notwendig. Zur Festlegung der Bohrstelle wurde vom Geodätischen Institut im Rahmen einer mehrwöchigen Messkampagne während der Trockenzeit 2003 ein insgesamt 2,4 km langer Polygonzug mittels moderner Laser-Tachymetrie durch die Höhle und oberirdisch durch die felsige Karsthügellandschaft abgesteckt. In dem ca. 200m langen Seebereich am Höhlenende konnten Standpunkte nur von Schlauchbooten aus über selbstgefertigte Wandkonsolen realisiert werden (**Abb.11**). Die Anforderungen an die Messgenauigkeit waren enorm da der Schacht die Höhlenwand exakt tangential anschneiden musste.



Abb.11 Tachymetrische Vermessungsarbeiten im Bereich des Höhlensees

Das Ergebnis der Messkampagne wurde in Karlsruhe mit großer Spannung erwartet, da bei den starken Geländegradienten des Hügelkarstes sowohl die Bohrtiefe als auch die Zugänglichkeit der Schachtbohrstelle zunächst völlig ungewiss war. Große Erleichterung machte sich breit als die Nachricht eintraf, die Bohrstelle läge in einer Talsohle unweit eines kleinen Feldweges. Die Bohrtiefe wurde auf 98,5 m ermittelt. 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.

Vom *Department of Public Work Yogyakarta* wurde daraufhin gemeinsam mit den Bewohnern der umliegenden Dörfer der 5 km lange Pfad zu einer Zufahrtsstraße ausgebaut. Eine Probebohrung mit einem Durchmesser von 20 cm sollte Erkenntnisse über den (hydro-)geologischen Aufbau des Karstkörpers erbringen und die Vermessungsarbeiten validieren.

Von der Horizontalen in die Vertikale

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. Der hydraulisch angetriebene Schrämkopf hat eine Leistung von 110 kW und rotiert am Schrärmarm 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.

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. Der Zwischenraum, der durch den Überschnitt 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 Bohrabschnitt über Hohlkolbenzylinder gleichmäßig abgeteuft. Während des Bohrvorganges sind hydraulisch betriebene Grippereinheiten aktiv, die den Schild im Gestein in Position halten. Das Vermessungssystem zum lotrechten Abteufen wurde vom Geodätischen Institut 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. Ein weiterer wichtiger Meilenstein war geschafft (**Abb.12, 13, 14**).

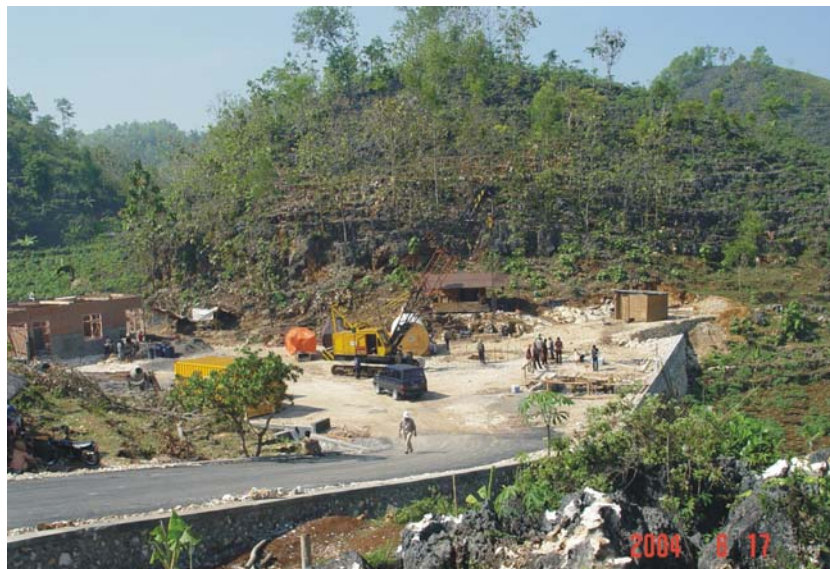


Abb.12 Schachtbaustelle 2004 (oben: nach Ausbau einer Zufahrtsstraße; Mitte: Vorbereitung der Baustelleninfrastruktur; Unten: Beginn der Bohrarbeiten)



Abb.13 Blick in den Zugangsschacht (links) / Bohrkopf an der Schachtsohle (rechts)



Abb.14 Schachtdurchbruch im Dezember 2004

Anlagenplanung – ein iterativer Prozess

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 (**Abb. 15**).



Abb.15 Gesteinsuntersuchungen im Bereich des geplanten Sperrwerks

Neben der Dimensionierung des Sperrwerks 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. Für die Sperrmauer wurde u. a. ein chemisch sehr langsam reagierender Zement gewählt, so dass zusammen mit in der Mauer angeordneten wasserdurchflossenen Kühlschlangen die maximalen Temperaturen beim Betonieren auf ca. 40 - 45 °C beschränkt werden können.

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 Fließgewässern 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.

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 Wasserdruckversuche 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.

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 ein 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 genutzt (**Abb.16**).

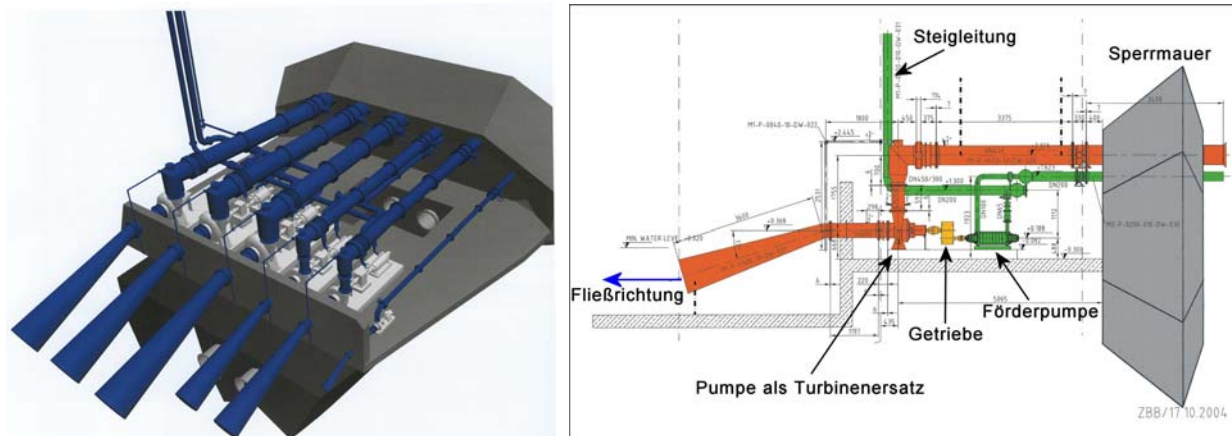


Abb.16 Modular aufgebaute Wasserförderanlage (Planungszustand)

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. Die modifizierte PAT besitzt bei 15 m Druckhöhe ein Schluckvermögen von 375 l/s und einen Wirkungsgrad von 81 %. Ihre Nenndrehzahl beträgt 1200 U/min und treibt über das Getriebe die Förderpumpe an, welche im Nennpunkt bei ca. 2200 U/min läuft und knapp 17 l/s in den Hochbehälter fördert. Dieses erste Fördermodul, das Modul zur Eigenstromversorgung sowie das SPS-gestützte Steuerungssystem, welches in Zusammenarbeit mit der Firma Walcher GmbH entwickelt wurde, befindet sich zur Zeit auf dem Seeweg zum Hafen Jakarta und wird im Frühjahr 2006 von Mitarbeitern des IWG und der Wasserbehörde Gunung Kiduls installiert.

Schichtbetrieb unter Tage

Nachdem die Starkniederschläge im Einzugsgebiet des unterirdischen Flusses Kali Bribin seltener wurden, konnte im April 2005 mit den Ausbauarbeiten 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. Um den Wasserspiegel im See abzusenken wurde im Juli 2005 der unterstromige Siphon von zwei deutschen Höhlentauchern erforscht. Bei starker Trübung ertasteten sich die Taucher, an einer Führungsleine gesichert, den Weg durch zwei aufeinanderfolgende labyrinthische Siphons von 35 und 65 m Länge. Dahinter taten sich Höhlenräume sensationellen Ausmaßes auf. Es zeigte sich, dass der Wasserstand im Höhlensee durch einen Felssturz hinter dem zweiten Siphon kontrolliert wird. In einem mehrtägigen Arbeitseinsatz wurde von den Tauchern mit Brechstangen und alternativen Sprengmethoden der Fließquerschnitt hinter den Siphons aufgeweitet, wodurch der Wasserspiegel im See um immerhin zwei Dezimeter abgesenkt werden konnte.

Erst Mitte August war die Baugrube zum ersten Mal wasserfrei. Segmentweise wurden die Hochwasserentlastungsrohre ($\varnothing$ 800 mm) von jeweils 20 m Länge eingebracht, durch die während der Bauphase das anströmende Wasser geleitet werden sollte. Nun begann ein gnadenloser Wettlauf mit der Zeit, denn das Betonsperrwerk sollte bis zum Ende der Trockenzeit im Dezember 2005 fertiggestellt und belastbar sein. Mit erstaunlichem Engagement wurden von indonesischer Seite die Bauarbeiten im Mehrschichtbetrieb Tag und Nacht vorangetrieben. Über 100 m³ Gestein mussten 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 werden. Über 200 Felsankerbohrungen wurden

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.17**).



Abb.17 Stand der Bauarbeiten Dezember 2005

Die Erstellung des Sperrwerkes war auf Anfang Dezember geplant. Doch es kam anders: Am 3. und 11. Dezember 2005 wurde die unterirdische Baustelle durch Hochwasserwellen mit Abflussspitzen von über 7 m³/s überflutet. Beim ersten Ereignis kam es zu einem Versagen der oberstromigen Sandsackbarriere, die zweite Welle führte zu einer Überströmung des verstärkten und erhöhten Wasserhaltungsdammes. Glücklicherweise konnten sich trotz des relativ schnellen Wasserspiegelanstieges die Arbeiter rechtzeitig über den Schacht in Sicherheit bringen. Aufgrund des hohen Sicherheitsrisikos wurde in Abstimmung mit den indonesischen Partnern eine Unterbrechung der Arbeiten vereinbart. Eine Überflutung der Baustelle während bzw. kurz nach den Betonierarbeiten zum Sperrwerk hätte aus bautechnischer Sicht ungleich größere Schäden zur Folge und ist somit nicht zu verantworten. Mit einer signifikanten Abnahme des Hochwasserisikos ist erst ab März 2006 zu rechnen. Der aktualisierte Zeitplan sieht nun den ersten Probееinstau im April und die Inbetriebnahme der Gesamtanlage zu Beginn der Trockenzeit 2006 vor.

Mit einer signifikanten Abnahme des Hochwasserrisikos ist erst ab April 2006 zu rechnen. Der aktualisierte Zeitplan sieht nun den ersten Probееinstau im Juli und die Inbetriebnahme der Gesamtanlage in der zweiten Jahreshälfte 2006 vor.

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.

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 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 Karstaquifern zur Trinkwasserversorgung hat aber auch globale Relevanz. 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 weltweiten politischen Situation von existentieller Bedeutung ist.

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

Nachtrag (Juli 2006):

Am 27. Mai 2006 ließ um kurz vor 6 Uhr morgens ein Erdbeben der Stärke 6,3 (Richterskala) den Boden an der Südküste der Insel Java für 57 Sekunden erschüttern. Das Epizentrum lag 25 km süd-östlich der Stadt Yogyakarta am Ostrand Gunung Kiduls. 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's 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. So wurden in den ersten Tagen gemeinsam mit Cap Anamur neben medizinischer Unterstützung vor allem Hilfsgüter, wie Nahrungsmittel und Zeltplanen, aber auch Werkzeuge für die Aufräumarbeiten, in die am stärksten betroffenen Gebiete gebracht. Hierbei konzentrierte man sich auf entlegene Gebiete, die von den größeren Hilfstransporten anderer Organisationen bisher nicht erfasst wurden. Des Weiteren wurde durch die Universität Karlsruhe mit Unterstützung des BMBF und Cap Anamur ein Sofortprojekt zum Wiederaufbau einer Schule sowie Sanierung eines Krankenhauses gestartet. Die Baustelle in Gua Bribin blieb weitestgehend unversehrt. Die Arbeitskräfte der indonesischen Baufirma wurden jedoch umgehend zu Aufräumarbeiten abgezogen, sodass die Fortführung des Ausbaus der Höhle verzögert wird.

Die Bedeutung internationaler Kooperationen wurde für die Provinz Yogyakarta durch das Beben mehr denn je deutlich. Die Regierungsvertreter des Sultanats sowie der Bupati des Distrikts Gunung Kidul bedankten sich ausdrücklich für die ersten Hilfeleistungen der Universität Karlsruhe gemeinsam mit Cap Anamur. Insbesondere die Bereitschaft an Wiederaufbauprojekten mitzuwirken, wurde äußerst positiv aufgenommen. Am 10. Juni 2006, 14 Tage nach dem Beben, wurde vom Leiter der Planungsbehörde Bapeda Ir. Bayudono MSc. in direkter Abstimmung mit dem Gouverneur der Provinz Sri Sultan Hamengku Buwono ein „Letter of Intend“ zwischen der Provinz Yogyakarta und der Universität Karlsruhe bzgl. des IWRM-Vorhabens als 2+2 Konzeption unterzeichnet.

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

Blaß, H.J., P. Fellmoser (2005): "Druckrohrleitungen aus Holz". In: Bauen mit Holz, Heft 9, S. 34-38, Bruderverlag Karlsruhe

Bundschuh P. & Lauer K (2005): Unterirdische Karstfließgewässer als Ressource zur Trinkwasserversorgung. – Literaturstudie Institut für Mineralogie und Geochemie der Universität Karlsruhe, 84 S.

Flathe, H. und Pfeiffer, D. (1965): „Grundzüge der Morphologie, Geologie und Hydrologie im Karstgebiet Gunung Sewu/Java (Indonesien)“. In: Bundesanstalt für Bodenforschung und den Geologischen Landesämtern der Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.); Geologisches Jahrbuch, Band 83, S. 533-562; Hannover

Lehmann, H.H. (1936): „Morphologische Studien auf Java“, Geographische Abhandlungen, 3.Reihe, Stuttgart

Lukas M. und Steinhilper D. (2005): Living conditions in the Gunung Sewu karst region (Java, Indonesia) - The example of the community of Dadapayu; Werkstattpapier Nr.13, Institut für Geographie, Justus-Liebig-Universität Gießen

Meyer, L. (2005): „Entwicklung und Einsatz einer Vertikalbohrmaschine in Indonesien“. In: Glückauf 141 (2005) Nr.1/2 S.58–63

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

Müller, H. S., Vogel, M. (2004): Sanierungskonzepte für Wasserbauwerke zur Verbesserung der Betriebssicherheit (Teilprojekt IV/4). Schlussbericht zum Verbundprojekt: Wolga-Rhein-Projekt: Deutsch-russisches Kooperationsprojekt zur Wassergüte- und Wassermengenbewirtschaftung an Wolga und Rhein. Auftrag-

geber: BMBF, Förderkennzeichen 02WT0096, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Universität Karlsruhe (TH)

Müller, H. S., Bohner, E. und Günter, M. (2006): Repair of historical concrete structures and monuments. Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting; Alexander (eds.), Taylor and Francis Group, London

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)

Nibbering, J. W. (1991): Crisis and Resilience in Upland Land Use in Java; In: Hardjono (Ed.); Indonesia: Resources, Ecology, and Environment, S. 104-132; New York

Oberle, P., J. Kappler, B. Unger (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)

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)

Tiede, K. (2005): „Fixierung von Schwermetallen an Mn-Oxihydroxid-reichen Ablagerungen und an vulkanischen Aschen zur Trinkwasseraufbereitung in Gunung Sewu, Indonesien und Akaki, Äthiopien.“ - Diplomarbeit am Institut für Mineralogie und Geochemie der Universität Karlsruhe

Uhlig, H. (1980): Man and Tropical Karst in Southeast Asia – Geo-ecological Differentiation, Land Use and Rural Development Potentials in Indonesia and other Regions; In: GeoJournal 4.1, S. 31-44; Wiesbaden

Unger B. und Lux T. (2005): Der Einfluss von Wasser auf die Lebensbedingungen in Gunung Sewu, Indonesien; In: Pacific News Nr. 23, S.17-19; Göttingen.