

Andreas Zeiselmaier, Alexandra Konz und Christoph Rapp

# Kleinstwasserkraft zur elektrischen Versorgung eines Dorfes im Regenwald Ecuadors

Im Sommersemester 2010 wurden an der Technischen Universität München mehrere Abschlussarbeiten verfasst, die die infrastrukturelle Entwicklung einer Gemeinde im Regenwald Ecuadors zum Thema hatten. Neben der Erstellung eines Entwässerungsplanes und der Konzeption der Trinkwasserversorgung wurde die Elektrifizierung des Dorfes mittels Kleinstwasserkraft untersucht. Technische Realisierbarkeit und sozialer Einfluss der Maßnahme wurden während einer dreiwöchigen Reise nach Ecuador erfasst. Es konnten zwei Alternativen ausgearbeitet werden, bei denen der ökologische Eingriff minimal ist und sich deren Umsetzung unter Einbeziehung der Einheimischen durchweg positiv auf die Gemeinschaft auswirkt.



**Bild 1:** Die beiden Wasserkraftbeauftragten Tibi und Fermeng bei der Besichtigung eines potenziellen Standorts

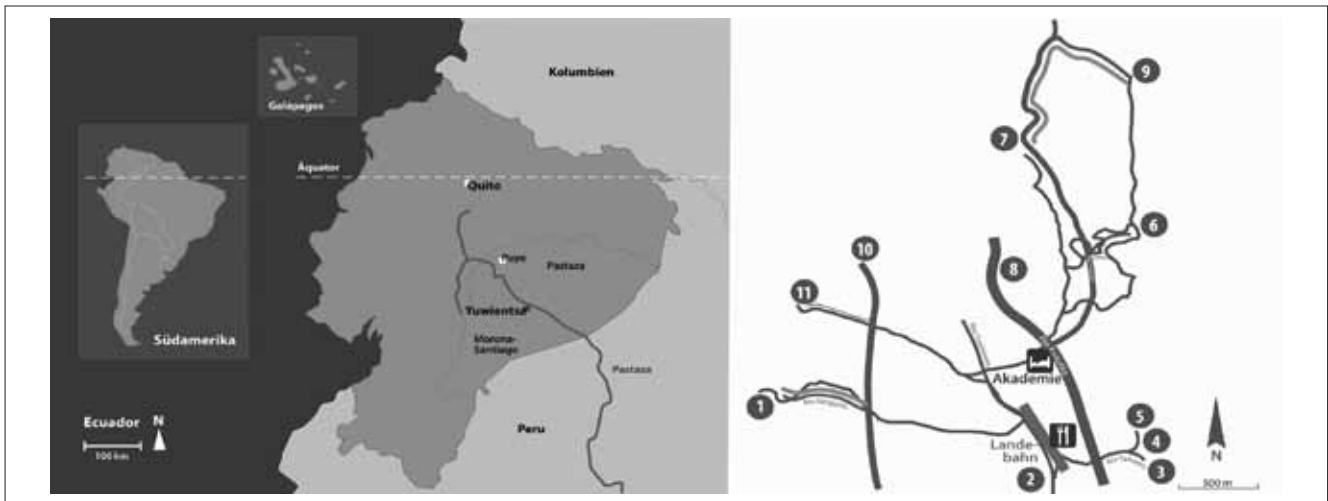
## 1 Einleitung

Der Regenwald Ecuadors zählt zu den am besten erhaltenen Primärwäldern der Erde, so dass das sensible Ökosystem von der UNESCO zum Biosphärenreservat erklärt wurde (**Bild 1**). Der Erhalt dieser grünen Lunge ist wegen des Rohstoffreichtums durch den potenziellen Zugriff der Erdöl-, Gas- und Holzindustrie stark gefährdet. Um die indigenen Bewohner, die sich bewusst für die Bewahrung ihrer Tradition und das Leben im Regenwald entschieden haben, vor den Interessen internationaler Unternehmen zu schützen, fördert die UNESCO die nachhaltige Entwicklung der Gemeinden. Dabei stehen neben der Befriedigung menschlicher Grundbedürfnisse die Bereitstellung medizinischer Versorgung sowie die Bildung im Vordergrund. Eine weiterführende Ausbildung sollen zukünftig die Indígenas der Shuar an einer so genannten Urwald-Akademie im ca. 300 km südlich von Quito liegenden und nur mit Kleinflugzeugen erreichbaren Dorf Yuwienta im Regenwald Ecuadors genießen (**Bild 2 links**). Um die Auswirkungen auf die gesellschaftliche Entwicklung der Gemeinde mit ca. 250 Einwohnern und der weiteren Region abzuschätzen und eventuellen Konflikten vorzubeugen, fand eine Sozialverträglichkeitsprüfung („Social Impact Assessment“) auf Grundlage des „Centre for

Good Governance“ der UN statt [4]. Ergebnis dieser Studie war, dass sich die Elektrifizierung unter Einbeziehung der Bevölkerung positiv auf die Entwicklung des Dorfes auswirkt.

Die Planung der infrastrukturellen Erschließung der Akademien, die von dem Künstler Markus Heinsdorff entworfen wurden, wird im Rahmen von Abschlussarbeiten von Studierenden der Technischen Universität München übernommen. Neben der Wasserver- und Entsorgung steht die Bereitstellung geringer Mengen elektrischer Energie (etwa 10 kW) durch Wasserkraft im Zentrum des Vorhabens. Die Energie soll für die Beleuchtung der Ausbildungsräume und Wohnhütten, Computer mit satellitengestütztem Internetanschluss und für einen Medikamentenkühlschrank genutzt werden. Die Stromerzeugung durch Kleinstwasserkraft liegt durch den geringen ökologischen Eingriff und die Verfügbarkeit von Wasser in der Region nahe; die Verteilung soll über ein Inselnetz erfolgen.

Während einer zweiwöchigen Reise in den Regenwald konnten in der Nähe des Dorfes ein Standort für ein Wasserrad sowie ein weiterer für eine Druckleitung mit Gleichdruckturbine ausgemacht werden. Bei der Planung beider Alternativen wurde großes Augenmerk auf eine einfache und robuste Ausführung mit geringem Wartungsaufwand, die Verwendung lokal



**Bild 2:** Ecuador-Karte mit dem Dorf Yuwienta (links); Karte von Yuwienta mit potenziellen Wasserkraftstandorten (rechts)

verfügbarer Materialien und die Einbeziehung der Bevölkerung gelegt.

## 2 Hydrologie

Die Untersuchung der hydrologischen Randbedingungen bildete die Grundlage zur Überprüfung der Machbarkeit. Da bislang kaum etwas über die gewässerkundlichen Parameter in und um Yuwienta bekannt ist, waren die Erfahrungen und Beobachtungen der Einheimischen die wichtigste Auskunftquelle. Um die Niederschlags- und Abflussverhältnisse abschätzen zu können, wurden Kurzzeitmessungen während des Aufenthalts vor Ort durchgeführt. Die Auswertung der Daten bestätigte, dass eine Vergleichbarkeit mit Niederschlagsaufzeichnungen der 150 km entfernten Stadt Puyo gegeben ist [2].

Die Verhältnisse in Yuwienta sind demnach geprägt durch tropisches Tageszeitenklima mit nahezu konstanter Tagesmitteltemperatur von über 20 °C. Es gibt täglich aufkommende Bewölkung mit konvektiven Niederschlägen. Zudem existieren ausgeprägte Trocken- (August bis November) und Regenzeiten (Dezember und Januar sowie Mai bis Juli). Vom thermischen Typ gehört die Region zu den warmen Tropen, ombrometrisch ist sie mit einer hohen Luftfeuchtigkeit von ca. 84 bis 93 % als hyperhumid zu bezeichnen; das Bioklima ist pluvial.

In einer Vielzahl von Gesprächen mit Anwohnern der einzelnen Gewässer und den Dorfältesten ergab sich ein erstes Bild über das langjährige Verhalten der Abflüsse, wobei die Aussagen von „dieser Bach hat das ganze Jahr über Wasser, in der Tro-

ckenzeit aber nur etwa die Hälfte“ bis zu „die maximale Fließtiefe, die an dieser Stelle je gesehen wurde war hier“ gingen.

Eigene hydrologische Beobachtungen führten im Einklang mit den Aussagen der Bewohner zu dem Ergebnis, dass generell mit einer kurzen Reaktionszeit der Flüsse auf Niederschlagsereignisse zu rechnen ist. Das beobachtete Phänomen hängt mit der ausgeprägten Topografie und den typischen Untergrundverhältnissen zusammen. Das bedeutet, dass bei heftigen Niederschlägen, wie sie in der Region während der Regenzeit an der Tagesordnung sind, sehr schnell mit großen Abflüssen gerechnet werden muss.

Um die jahreszeitliche Schwankung besser abschätzen zu können, wurde ein Messpegel für Langzeitmessungen mit den Indígenas installiert. Zudem soll durch regelmäßige Abflussmessungen an den geeigneten Standorten ein Überblick über die lokalen Abflussschwankungen gewonnen werden.

Doch selbst mit den neu gesammelten Daten ist die Hydrologie schwierig abzuschätzen. Deshalb ist es unbedingt erforderlich den Sicherheitsfaktor entsprechend anzupassen. Gerade für den Hochwasserschutz der Anlagen, vor allem gegen Treibgut, muss entsprechend vorgesorgt werden, was konzeptionell besondere Berücksichtigung fand.

## 3 Standortwahl

Zentrale Aufgabe vor Ort war die Begehung möglicher Standorte mit den Einheimischen. Mittels GPS, Höhenmesser und Maßbändern wurden Lage- und Höhenvermes-

sung der potenziellen Installationsorte durchgeführt. Zudem fanden Abflussmessungen mittels Eimer und Stoppuhr bzw. Abschätzung durch Messung von Oberflächengeschwindigkeit und Querschnitt statt. Die Vor-Ort-Planung der baulichen Eingriffe sowie topografische Dokumentation wurde durch Fotos weiter unterstützt.

Um eine Abschätzung des Leistungspotenzials der Standorte vor Ort durchführen zu können, wurde die vereinfachte Leistungsgleichung herangezogen:

$$P \approx 8 \cdot Q \cdot H \text{ [kW]} \quad (1)$$

Sie gibt bei konventionellen Wasserkraftturbinen den Zusammenhang von resultierender Leistung zu Abfluss  $Q$  und Fallhöhe  $H$  an. Im Falle eines Wasserrads reduziert sich das Ergebnis aufgrund eines geringeren Gesamtwirkungsgrads.

Es wurden insgesamt elf potenzielle Standorte mit einer Leistungsausbeute zwischen 5 kW und 35 kW identifiziert (**Bild 2 rechts**). Nach Abschluss der Begehungen wurden die besuchten Plätze in einer Standortmatrix bewertet. Letztlich können anhand eines festen Richtwerts von 10 kW gewünschter Ausbauleistung mehrere Optionen untersucht und diejenige gewählt werden, welche Optimum aus minimalem Aufwand, geringen Kosten, kleinem ökologischen Eingriff und robuster Bauweise bildet.

## 4 Planung

### 4.1 Variante Wasserrad

Unter anderem konnte ein Standort am Fluss Yuwints gefunden werden, der sich

zur Installation eines Wasserrades angeboten. Der Standort 7 ist durch einen kleinen Wasserfall zwischen zwei breiten Felsen gekennzeichnet, der in ein Becken von 11 m Breite und einer Tiefe von mehr als 1,5 m mündet (**Bild 3**). Es ist eine Fallhöhe von 2,2 m verfügbar. Der Abfluss von 1,2 m³/s wurde durch das Erstellen eines Flussprofils und Messung der Oberflächengeschwindigkeit bestimmt.

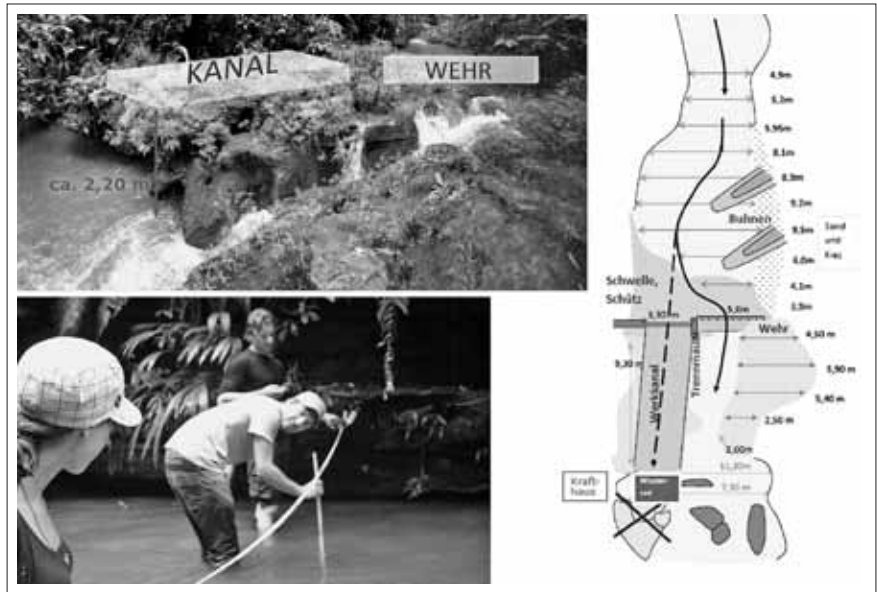
Der Standort stellt nach erster Abschätzung folglich eine Leistung von etwa 18 kW zur Verfügung.

Geplant wurde die technische Umsetzung eines oberflächigen Wasserrades mit Maßen von 3,5 m Breite und 1 m Radius, welches relativ einfach, kosteneffizient und mit überwiegend lokalen Materialien herzustellen ist [3]. Bei der Gründung des Wasserrades ist allerdings besondere Vorsicht geboten, da der Untergrund nicht ausreichend untersucht werden konnte. Die Wasserspende ist laut der Indígenas relativ konstant. Deshalb kann mit einer gleichmäßigen Leistungsbereitstellung durch das Wasserrad gerechnet werden.

Die größte Herausforderung ist der Hochwasserschutz der Anlage infolge der Abflüsse und des möglichen Treibgutabfalls. Um die Konstruktion bestmöglich vor Beschädigungen zu bewahren wird der Einbau des Rades in der in Bild 3 dargestellten Nische empfohlen [2]. Der Werkkanal kann über einen Schütz den Zulauf drosseln bzw. verschließen, so dass das Wasser über das Wehr im ursprünglichen Bett abfließen kann. Das Krafthaus (ca. 5 m²) ist aus diesem Grund auf einer kleinen Anhöhe geplant, so dass der Generator über einen Keilriemen angetrieben werden muss.

**4.2 Variante konventionelle Turbine**

Bei der Verwendung konventioneller Turbinentypen mit Druckrohrleitungen kommen zwei Standorte in Frage. Die Trass-



**Bild 3:** Standort zur Installation eines Wasserrads am Río Yuwints (7) mit geplanten baulichen Maßnahmen (links oben); Vermessung des Querschnitts zur Abflussbestimmung (links unten); Standortskizze mit vorgeschlagener baulicher Umsetzung (rechts)

sierung der Druckrohrleitung ist hierbei von besonderem Interesse. Es bietet sich eine Anordnung entlang eines bereits bestehenden (Fluss-) Tals an, auch um Probleme, wie beispielsweise Lufteinschlüsse, zu vermeiden. Für beide Standorte eignen sich aufgrund des Durchflusses und der Fallhöhe Gleichdruckturbinen am besten. Zudem sprechen der geringe Wartungsaufwand und die Zuverlässigkeit für Pelton- oder Durchströmturbine.

Der Standort 1 liegt an dem kleinen Fluss Río Yangunts, der unweit vom Dorfzentrum auf einer möglichen Rohrleitungslänge von 600 m eine Höhendifferenz von etwa 82 m überwindet. Die Wasserspende ist nach Auskunft der Bewohner leicht schwankend, jedoch durchgehend verfügbar. Mit Eimer und Stoppuhr wurde eine Abflussmenge von ca. 25 l/s gemessen. Durch ein bereits vorhandenes natürliches Wasserbassin (ca. 20 m³)

kann eine Wasserfassung mit relativ geringem Aufwand gebaut werden. Zu diesem Zweck kann der Ablauf mit Hilfe einer 3 m hohen Staumauer verschlossen werden. Der Grundablass kann als Rohreinlauf direkt in die Mauer integriert werden (**Bild 4 links**).

Eine weitere Alternative ist Standort 9 am Fluss Yuwints. Die mögliche Wasserfassung ist hier ganz ähnlich zum Standort 1 ausgebildet (**Bild 4 rechts**). Der Abfluss liegt mit 35 l/s etwas höher. Auf eine Rohrleitungslänge von 1 500 m ergibt sich hier eine Fallhöhe von 100 m. Dieser Standort würde eine erhöhte Leistungsausbeute ermöglichen, besitzt allerdings den Nachteil einer deutlich längeren Rohrleitung und größeren Entfernung zum Dorfzentrum.

Zur Abschätzung der verfügbaren Nettofallhöhe  $H_N$  wurde die Gleichung nach Darcy-Weisbach, für Gleichdruckturbinen verwendet (z. B. [1]):

$$H_N = v_D^2/2g = H_B - v_R^2/2g (\lambda l/D + \Sigma \zeta_i) \quad (2)$$

Sie gibt die Nettofallhöhe  $H_N$  bzw. die Düsenaustrittsgeschwindigkeit  $v_D$  in Abhängigkeit von Bruttofallhöhe  $H_B$ , Geschwindigkeit im Rohr  $v_R$  und den Verlustwerten  $(\lambda l/d + \Sigma \zeta_i)$  an.

Es ergibt sich ein tatsächliches Leistungspotenzial am Standort Yangunts (1) innerhalb eines Bereichs von 10 bis 13 kW, am Yuwints (9) wären ca. 20 kW möglich. Eine Auslegung auf etwa 10 % hydrau-



**Bild 4:** Die beiden Standorte am Río Yangunts (1) (links) und Río Yuwints (9) (rechts) für eine mögliche Wasserfassung bei der Verwendung einer konventionellen Wasserkraftanlage mit Druckrohrleitung

lischer Verluste, wie normalerweise üblich, ist in diesem Fall nicht relevant [5]. Da nur eine Leistung von etwa 10 kW benötigt wird, bietet dies die Möglichkeit zur Kostenoptimierung. Aus logistischen, aber auch finanziellen Aspekten kommt nur eine PVC Rohrleitung in Frage. Unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit in Ecuador ergibt sich am Standort Yangunts (1) bei einem Durchmesser von 0,125 m eine Nettofallhöhe von  $H_N = 58,3$  m und somit ca. 11 kW elektrische Leistung. Bei demselben Durchmesser werden am Standort Yuwints (9) aufgrund der längeren Leitung  $H_N = 47,4$  m und etwa 10 kW erhalten. Damit fällt die Entscheidung auf den Standort Yangunts (1) mit der höheren Leistung und der deutlich kürzeren und damit günstigeren Leitung. Zudem ist dort der Bemessungsdruck (inkl. Joukowsky-Stoß) mit  $p_{max} = 15,3$  bar geringer (Yuwints 17,7 bar) [6]. Mit dem Charakteristiken-Verfahren konnte nachgewiesen werden, dass sich der maximale Druck bei einer Verschlusszeit von 5 s auf 12,5 bar, bei 10 s gar auf unter 10 bar reduziert. Zusätzlich wurde abgeschätzt, ob mit dem Einbau eines Windkessels der Druckstoß weiter gedämpft werden kann. Dies gelingt zwar bei kürzeren Verschlusszeiten (bei 2 s um 1,3 bar, bei 3 s um 2,4 bar, und bei 4 s um 2,2 bar), allerdings wird aus Kostengründen ein langsames Verschließen >10 s empfohlen. Damit liegt der Auslegungsdruck bei PN16 mit einer Sicherheit von etwa 6 bar, wenn die Verschlusszeit eingehalten wird.

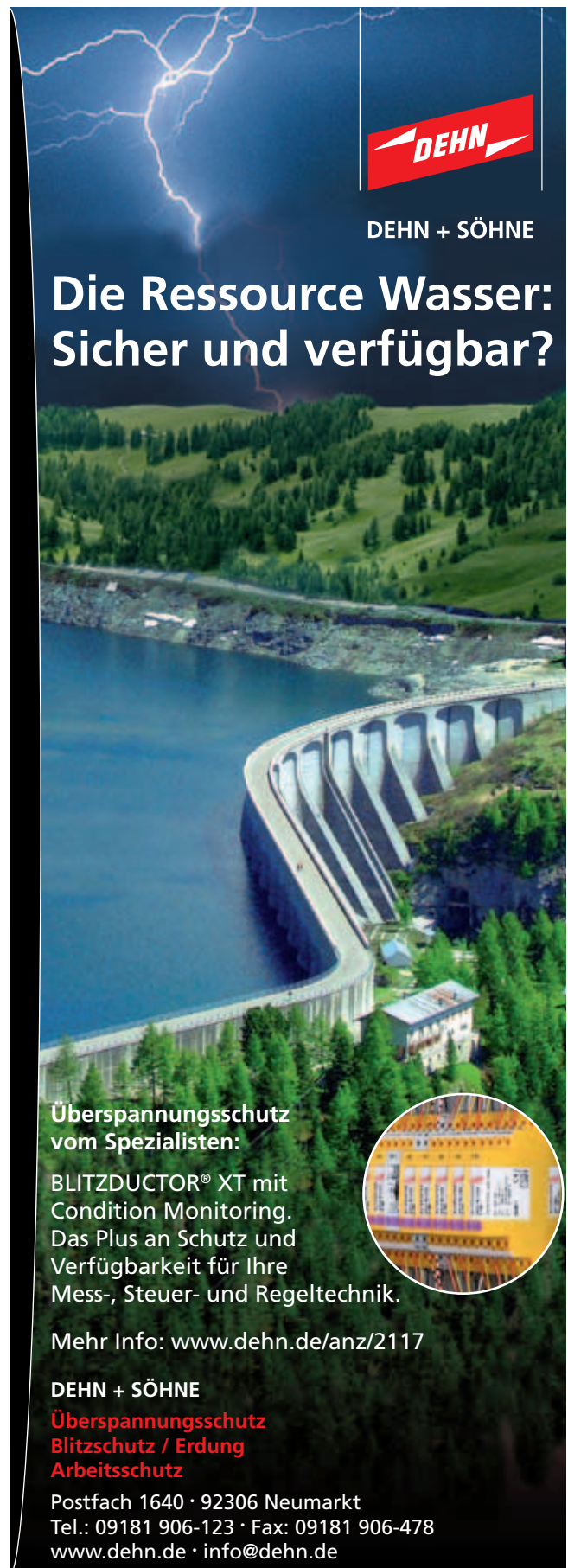
Die Wahl des Generators, die Regelung und die Stromverteilung sind vorrangig vom Betrieb im Inselnetz bestimmt. Aufgrund finanzieller Vorteile und des geringeren Gewichts zum Transport wird trotz des erhöhten regelungstechnischen Aufwands der Einsatz eines Asynchrongenerators empfohlen. Es wurde ein einfaches Krafthaus ( $5 \text{ m}^2$ ) für die Turbine und die elektrische Installation an einer geschützten Stelle vorgesehen.

## 5 Fazit und Ausblick

In dieser Studie konnten zwei Wasserkraftstandorte zur elektrischen Versorgung der Gemeinde in Ecuador identifiziert werden. An einer Stelle kann ein 2,2 m hoher Absturz genutzt werden, um ein Wasserrad anzutreiben; an einem anderen Ort eignet sich ein natürliches Becken als Einlauf in eine Rohrleitung. Das Schadenspotenzial durch Hochwasser wird beim Wasserrad als deutlich höher eingeschätzt, da das Krafthaus mit Turbine und Generator am Standort 1 abseits des Yangunts errichtet werden kann. Zwar existieren an beiden Standorten noch Unsicherheiten bei möglichen jahreszeitlichen Abflussschwankungen, diese werden aber durch längerfristige Datenerhebungen weiter analysiert. Generell muss der erzeugte Strom über Batterien gespeichert werden, um die Grundversorgung zu gewährleisten.

Welche der beiden vorgeschlagenen Varianten gewählt wird, hängt von den Finanzierungsmöglichkeiten und der Entscheidung der Gemeinde ab. Zu diesem Zweck wurden die Ergebnisse der Studie übersetzt und den Bewohnern in Yuwienta übergeben. Diese Studie dient als Grundlage für Finanzierungsanträge. Die Kosten für die Wasserradvariante werden auf 30 000 € geschätzt, während für die Variante mit konventioneller Turbine 50 000 € veranschlagt werden. Als preisbestimmend stellten sich Transport, Turbine, Leitung und Generator heraus.

Im Zentrum des Unterfangens stand und steht der Wissensaustausch (Bild 5) mit der Ausbildung von Wasserkraftbeauftragten. Durch eine sehr enge Zusammenarbeit bei den Begehungen sowie einer ständigen Absprache und Einbeziehung der betroffenen



**DEHN**

DEHN + SÖHNE

# Die Ressource Wasser: Sicher und verfügbar?

**Überspannungsschutz vom Spezialisten:**

BLITZDUCTOR® XT mit Condition Monitoring. Das Plus an Schutz und Verfügbarkeit für Ihre Mess-, Steuer- und Regeltechnik.

Mehr Info: [www.dehn.de/anz/2117](http://www.dehn.de/anz/2117)

DEHN + SÖHNE  
**Überspannungsschutz**  
**Blitzschutz / Erdung**  
**Arbeitsschutz**

Postfach 1640 · 92306 Neumarkt  
 Tel.: 09181 906-123 · Fax: 09181 906-478  
[www.dehn.de](http://www.dehn.de) · [info@dehn.de](mailto:info@dehn.de)



**Bild 5:** Demonstration der Funktionsweise der Wasserkraftnutzung durch ein Wasserrad-Modell, das der Gemeinde übergeben wurde

Andreas Zeiselmair, Alexandra Konz and Christoph Rapp

### Micro Hydropower for the Electrification of a Village in the Ecuadorian Rainforest

During the summer term 2010 several theses on the topic of infrastructural development of the village Yuwienta situated in the Ecuadorian rainforest were written at the Technische Universität München. One of these works was especially concerned with the electrical energy supply of the community and a planned rainforest academy by micro hydro power. Within this study a major task was to identify appropriate installation sites and to develop practicable structural measures. Finally two sites were investigated, one for the installation of a water wheel and another for the construction of a power plant using a conventional turbine with penstock. A special challenge was the lack of hydrological data which made it necessary to put more effort on flood prevention. Another central issue of the two-week stay at the village was the knowledge exchange and cooperation between the students and the Indígenas.

Андреас Цайзельмайр, Александра Конц и Кристоф Рапп

### Мини-электростанция для электроснабжения деревни в тропических джунглях Эквадора

В летнем семестре 2010 года в Техническом университете Мюнхена было написано несколько выпускных работ, темой которых было развитие инфраструктуры общины, находящейся в тропических джунглях Эквадора. Наряду с разработкой плана по осушению земель и созданием концепции снабжения питьевой водой был проработан вопрос об электрификации деревни посредством строительства мини-электростанции. Техническая осуществимость и социальное влияние такого мероприятия были определены во время трехнедельной поездки в Эквадор. Были разработаны 2 альтернативных варианта, при использовании которых экологическое вмешательство было бы минимальным и их реализация в условиях привлечения местного населения способствовала бы положительному воздействию на сообщество.

Dorfbewohner sowie Entscheidungsträger konnte ein Geben und Nehmen von Erfahrungen und Gelerntem ermöglicht werden. Dies bildete die Grundlage eines besseren Verständnisses für die gegenseitigen Lebenssituationen.

Weitere Informationen zu dem Projekt sind unter [www.ez.bv.tum.de](http://www.ez.bv.tum.de) zu finden.

#### Autoren

**Andreas Zeiselmair, B. Sc**

**Alexandra Konz, B. Sc**

**Dr.-Ing. Christoph Rapp**

Technische Universität München

Fachgebiet Hydromechanik

Arcisstraße 21, 80333 München

[andreas.zeiselmair@mytum.de](mailto:andreas.zeiselmair@mytum.de)

[alexandra.konz@gmx.net](mailto:alexandra.konz@gmx.net)

[rapp@tum.de](mailto:rapp@tum.de)

#### Literatur

- [1] Giesecke, J.; Mosonyi, E.; Heimerl, S.: Wasserkraftanlagen: Planung, Bau und Betrieb. 5., Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2009.
- [2] Konz, A.: Machbarkeitsstudie zur Errichtung einer Wasserkraftanlage zur elektrischen Versorgung des Dorfes Yuwienta im Regenwald Ecuadors – Variante Wasserrad. Technische Universität München, 2010.
- [3] Nuernbergk, D. M.: Wasserräder mit Freihang: Entwurfs- und Berechnungsgrundlagen. Detmold: Verlag Moritz Schäfer, 2007.
- [4] UN Centre for Good Governance (Hrsg.): A Comprehensive Guide for Social Impact Assessment. 2006 (<http://unpan1.un.org/intradoc/groups/public/documents/cgg/unpan026197.pdf>).
- [5] Williams, A.; Simpson, R.: Pico hydro – Reducing technical risks for rural electrification. In: Renewable Energy 34 (2009), Nr. 8, S. 1 986-1 991.
- [6] Zeiselmair, A.: Machbarkeitsstudie zur Errichtung einer Wasserkraftanlage zur elektrischen Versorgung des Dorfes Yuwienta im Regenwald Ecuadors – Variante mit einer konventionellen Wasserkraft-Turbine. Technische Universität München, 2010.



**Anzeigen-Service**  
**(0611) 7878 338**