

Hydrologische Modellierung für die Optimierung von Kleinwasserkraftwerkskaskaden

Der hydrologischen Modellierung des Wasserdargebotes im Flusseinzugsgebiet kommt bei Planung und Optimierung von Wasserkraftwerken, die häufig in komplexe Kraftwerkskaskaden eingebunden sind, eine große Bedeutung zu. In vielen Regionen der Welt fehlen jedoch oft die entsprechenden Eingangsdaten. Die zentrale Fragestellung dieser Arbeit lautet daher, ob es möglich ist, auf Basis öffentlich verfügbarer Datenquellen das Abflussregime eines Einzugsgebiets abzubilden, um Standortbewertung und energieoptimierte Nutzung der Wasserkraftanlagen zu gewährleisten.

Mariusz Merta und Harald Sommer

1 Veranlassung

Der Bedarf an kohlenstoffarmer und preisgünstiger Elektrizität hat die Wasserkraft zurück auf die Entwicklungsagenda gebracht. In der VR China soll die Verwendung von Holz und anderen Brennstoffen durch Kleinwasserkraftwerke (KWK) signifikant reduziert werden, um eine klimaverträgliche Energieinfrastruktur aufzubauen. Im Rahmen eines Programms der chinesischen Zentralregierung wurden allein bis zum Jahr 2015 über 1 000 KWK in 24 Provinzen als treibstoffsubstituierende Wasserkraftanlagen (Small Hydropower Substituting Fuel, SHSF) eingerichtet. Die installierte Anlagenleistung ist größer als die des Drei-Schluchten-Projekts am Yangtze.

Ein erheblicher Teil der Stromproduktion von Wasserkraftanlagen (WKA) ist auf den natürlichen Zufluss zurückzuführen. Für die Optimierung des Energiesystems einer WKA-Kaskade ist daher eine möglichst genaue Kenntnis des aktuellen, prognostizierten Wasserdargebotes im Einzugsgebiet notwendig. Um den langfristigen jährlichen Mittelwasserabfluss und die Abflussdauerlinie zu bestimmen, ist eine zuverlässige Zuflussprognose mit Hilfe von hydrologischen Modellen unerlässlich. Durch die Kopplung mit den Optimierungsmodellen kann ein Energiesystem bestehend aus WKA, Verbrauchern, Übertragung und Speichern dargestellt sowie optimiert werden. Im Zuge des Klimawandels werden die Anforderungen an die Steuerungsregeln, z. B. durch häufiger auftretende Extremereignisse, weiter steigen. Eine schnelle Reaktion auf veränderte Randbedingungen wird immer öfter notwendig sein. Hierfür kann die Opti-

mierung der Steuerung von WKA sowohl in Echtzeit als auch für die Zuflussprognosen genutzt werden. Da die WKA diverse Funktionen erfüllen (z. B. Hochwasserrückhalt, Trinkwasserversorgung), sind bei Steuerung und Optimierung dieser Anlagen diverse Randbedingungen zu beachten [1].

Vor diesem Hintergrund sollte in Rahm des deutsch-chinesischen Forschungsprojekts HAPPI ein Bewertungsansatz für Planung, Bau und Betrieb von WKA entwickelt werden. Ein besonderer Fokus lag dabei auf dem energetisch optimierten Nutzen des enormen, bisher unerschlossenen Energiepotenzials der Wasserkraft aus hydrologischer und hydraulischer Sicht. Für die Durchführung des Projektes wurden drei Modellregionen in der Provinz Guizhou ausgewählt. Diese Arbeit befasst sich mit dem Einzugsgebiet des oberen Wuyang-Flusses.

2 Projektgebiet

Das Einzugsgebiet des oberen Wuyang-Flusses liegt im östlichen Teil der Guizhou-Provinz zwischen 26° 50' und 27° 16' nördlicher Breite sowie 107° 30' und 108° 28' östlicher Länge (**Bild 1**). Der Wuyang-Fluss ist ein Nebenfluss von Yuanjiang und gehört zum Wassersystem des Yangtze-Flusses. Der obere Wuyang erstreckt sich über eine Länge von ca. 140 km und fließt durch die Bezirke Zhenyuan, Shibing und Huangping der autonomen Präfektur Qiandongan Miao und Dong. Von Beginn des Fließgewässernetzes im Osten bis zum Einzugsgebietsauslass in der Stadt Zhenyuan überwindet der Fluss einen Höhenunterschied von fast 800 m. Der Wuyang besitzt die typischen Eigenschaften eines Mittelgebirgsflusses, wie steile klammartige Täler in felsigen Gebirgslagen, verzweigter Gewässerlauf, turbulente Fließereigenschaften im Oberlauf und breite fruchtbare Täler im Unterlauf. Das Längsprofil verläuft in West-Ostrichtung und ist durch den typischen regelmäßigen Wechsel von Schnellen und Stillen gekennzeichnet. Das Gebiet umfasst eine Fläche von rund 2 400 km².

Das Einzugsgebiet des Wuyang-Flusses hat ein subtropisches, feuchtes Monsunklima mit milden Wintern und warmen Sommern. Die Monsunperiode dauert von Mai bis Anfang

Kompakt

- Hydrologische Modellierung des Wasserdargebotes im Untersuchungsgebiet erfolgte überwiegend auf der Grundlage frei verfügbarer Datenquellen.
- Das Modell wurde für den Entwurf von energetisch optimierten Kaskaden der Wasserkraftanlagen aus hydrologischer und hydraulischer Sicht angewendet.

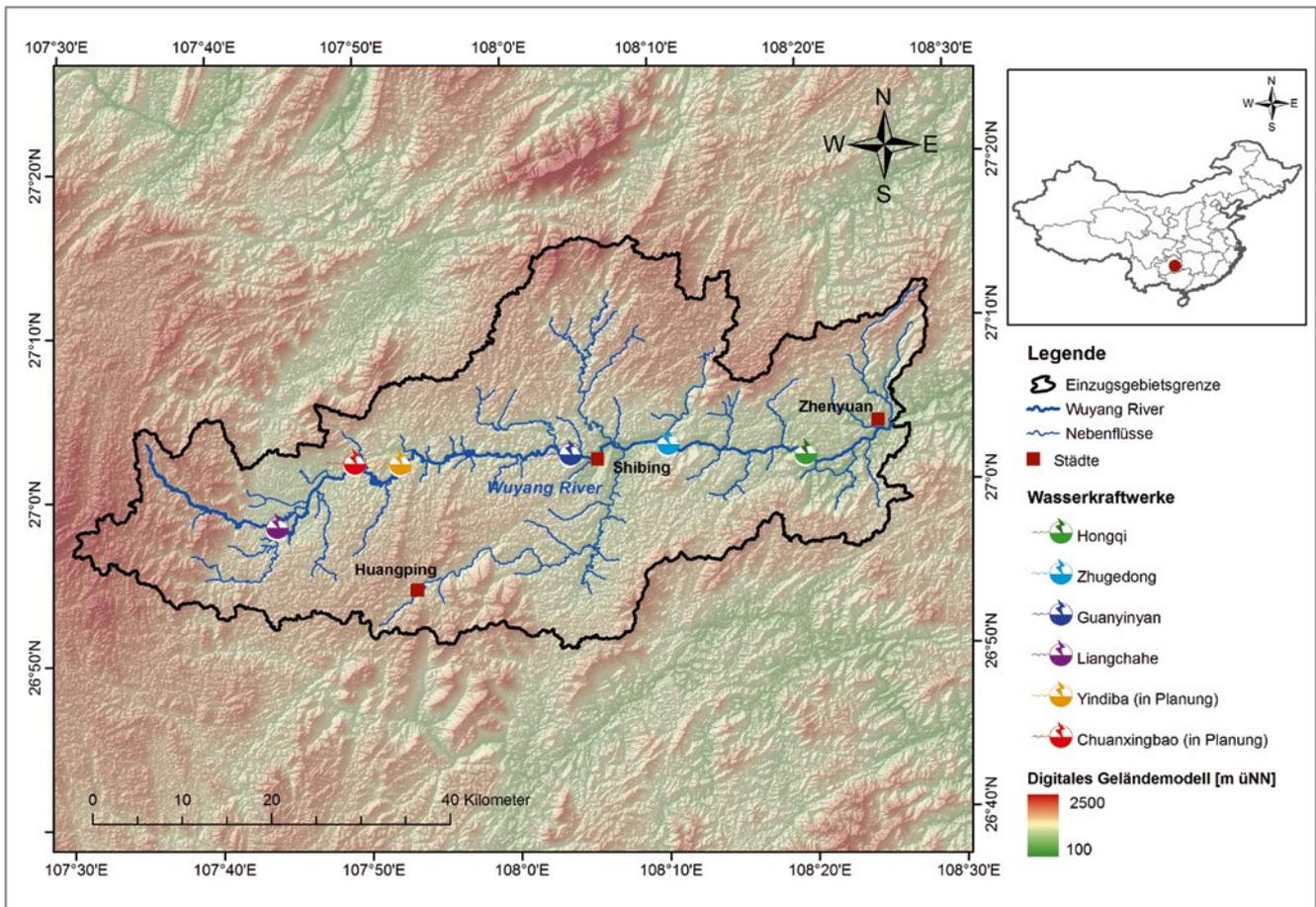


Bild 1: Einzugsgebiet des oberen Wuyang-Flusses, Provinz Guizhou

September und wird durch periodische Niederschläge, ansteigender Temperatur und Luftfeuchte, einen neblig bedeckten Himmel und flutartige Überschwemmungen charakterisiert. Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt 15,2 °C und der durchschnittliche Jahresniederschlag liegt bei 1 140 mm. Die regnerischsten Monate sind Mai und Juni. Von Oktober bis November kann es zum Postmonsun kommen, welcher sich in Form von vernachlässigbar wenigen Niederschlägen und fallenden Temperaturen äußert. Die Trockenzeit erstreckt sich über den Zeitraum von Dezember bis März, wengleich leicht durch Westwinde hervorgerufene Schauer vorkommen können. Des Weiteren beeinflussen die physiographische Gegebenheiten des Einzugsgebiets, sowie der Monsun die Temperaturverhältnisse und dessen jährliche Schwankungen. In den Wintermonaten können in den höheren Lagen die Temperaturen sogar unter Gefrierpunkt fallen.

Das Projektgebiet liegt auf dem östlichen Yunnan-Guizhou-Plateau und ist ein Teil der Yangtze-Kontinentalplatte. Das hohe geologische Alter der Region spiegelt sich in weit fortgeschrittenen Erosionsprozessen wider, die gefördert durch ein subtropisches humides Klima die spektakulären Kegelkarstformationen bilden. Die Bodenbedeckung der Karstformationen ist nur gering. Das Gebiet wird überwiegend durch Tonverlagerung geprägte Böden, wie Alisole und Luvisole, bedeckt.

Bedingt durch die großen Höhenunterschiede zeichnet sich das Einzugsgebiet des oberen Wuyang durch eine hohe Bio-

diversität aus. Die Exposition der Täler, die Steilheit der Hangneigung, die Höhe und andere physiografische Faktoren beeinflussen die klimatischen Bedingungen, welche signifikante Veränderungen in der Vegetation und der landwirtschaftlichen Nutzung innerhalb kurzer Distanzen bedingen. Die Gesamtfläche der Landschaft wird durch Wälder geprägt, die insbesondere in höheren Lagen sowie den Engtälern dominieren. Sie bilden einen wichtigen Wasserrückhalt für das Projektgebiet. Eine weitere dominierende Landnutzungsform sind die Grünlandflächen. Wegen der Topografie und der Landdegradation durch Bodenerosion sind nur ca. 15 % der Landfläche für die Landwirtschaft nutzbar.

Im Projektgebiet wird das Potenzial der Wasserkraft genutzt. Aktuell sind vier KWK (Liangchahe, Guanyinyan, Zhugedong und Hongqi) im Betrieb, zwei weitere (Chuanxingbao und Yindiba) befinden sich derzeit in der Planungsphase (**Bild 1**). Die existierenden Anlagen verfügen über eine Leistung von 30,6 MW.

3 Datengrundlage und Datenaufbereitung

Die Gebiete für die Einrichtung von KWK befinden sich meistens in Regionen, die weit von den Zentralen Chinas entfernt sind. Die Datengrundlage für die hydrologische Modellierung ist dort in der Regel nur unzureichend oder lückenhaft. Für die Erstellung

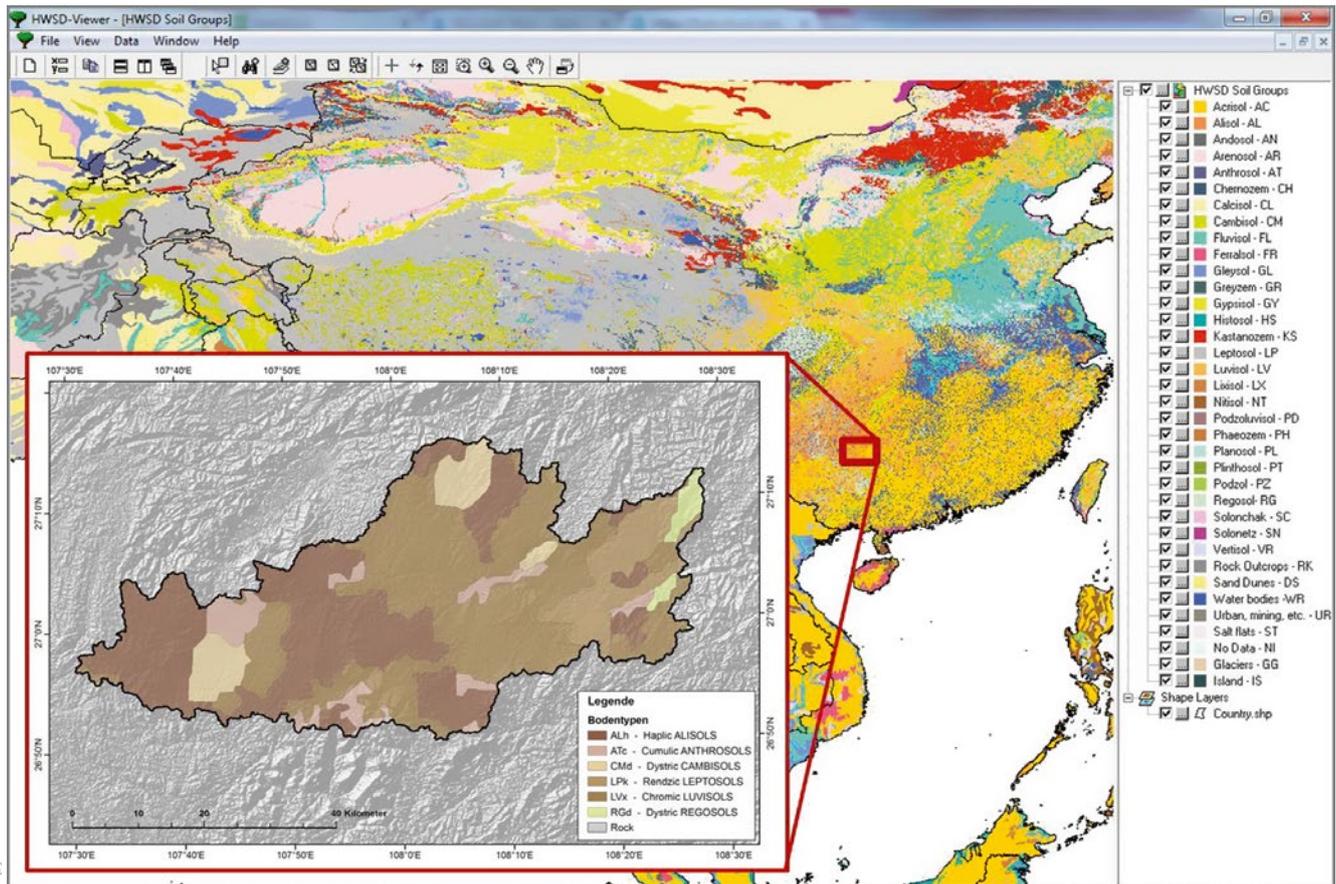


Bild 2: Ableitung der Bodenparameter mit dem HWSD-Viewer

von Einzugsgebietsmodellen bedeutet dies, dass nicht alle erforderlichen Parameter für die Modellierung vorhanden sind. Außerdem ist damit zu rechnen, dass die Daten nur teilweise digital vorliegen und ihre Güte den Modellanforderungen meistens nicht genügt. Da die Verfügbarkeit von digitalem Kartenmaterial im Einzugsgebiet des Wuyang-Flusses stark begrenzt war, wurde das hydrologische Einzugsgebietsmodell ausschließlich auf der Grundlage der frei verfügbaren Gebietsinformationen aus weltweit zur Verfügung gestellten Datenquellen erstellt. Im Vorfeld erfolgte eine ausführliche Qualitätskontrolle der Eingangsdaten und ihrer räumlichen Auflösung. Anschließend wurde eine umfangreiche Datenbank aufgebaut und an das Geografische Informationssystem (GIS) gekoppelt. Die GIS-Datenbasis besteht aus Flächengeometrien (Polygone, Grids bzw. Raster), die Sachdaten (Attributdaten) erhalten. Die GIS-gestützte Aufarbeitung der raumbezogenen Eingangsinformationen führte zur Entstehung einer definierten Datenstruktur, die alle notwendigen raumbezogenen Informationen für das hydrologische Modell enthält. Die so vorbereitete Datenbasis bildet eine Grundlage zur Ableitung der notwendigen Parameter, wobei Überlagerung der Einzugsgebietsgrenzen mit den einzelnen Informationseinheiten der Attributtabelle zur Erstellung kleinster gemeinsamer Geometrien führt und eine 1:N-Beziehung zwischen dem Objekt und dessen Eigenschaften ergibt.

Der Mindestdatenbedarf zur Erstellung der Flächen gleicher hydrologischer Prozessrelevanz (HRU) besteht aus einer Boden-

und einer Landnutzungskarte, denen über Attributtabelle hydrologisch relevante, physikalische Kennwerte zugeordnet werden können.

3.1 Digitales Geländemodell

Eine Grundvoraussetzung für die hydrologische Reliefanalyse des Einzugsgebietes (z. B. Fließrichtung, -länge, -akkumulation, Abflusskonzentration, Teileinzugsgebiete, Gewässernetz) ist die Verwendung von senkenfreien Geländemodellen. Für das hydrologische Modell wurden digitale Höhendaten von ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) mit einer Ortsauflösung von 30 m verwendet (Bild 1). Bis 83° Breite stellt die NASA die Daten für Forschungs- und Bildungszwecke im GeoTIFF-Format kostenlos zum Herunterladen bereit [2]. Bedingt durch die verwendeten Algorithmen enthält das ASTRA GDEM spezifische Anomalien und Artefakte, die eine direkte Auswirkung auf die Qualität der Höhendaten und somit auf die effektive Nutzbarkeit für die hydrologische Modellierung haben können. In nahezu allen ASTER-GDEM-Szenen treten regelmäßig und in hoher Anzahl die sogenannten Pits auf, die morphologisch gesehen als eine Senke beschrieben werden. Der Höhenfehler im Bereich der Anomalie kann zwischen wenigen Metern bis über 100 m schwanken [3]. Im Projektgebiet war es also erforderlich, lokale Senken aus dem Geländemodell zu eliminieren, indem die Senkenzelle auf das Niveau der niedrigsten Nachbarzelle gehoben wurde. Dieses senkenfreie DGM

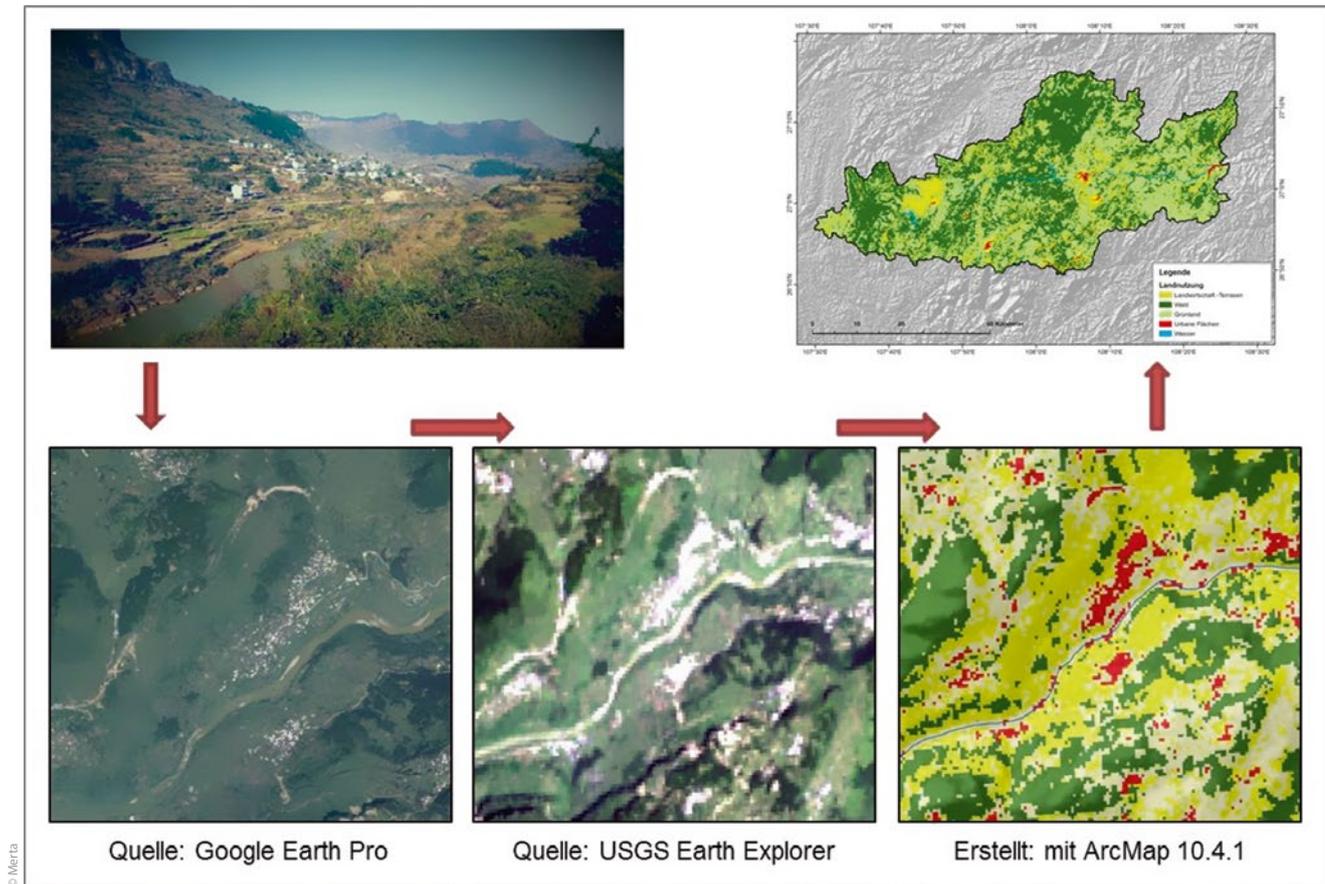


Bild 3: Ableitung der Landnutzungsklassen auf Basis der Landsat-Bilder

wurde anschließend als Eingangsdatensatz für Ausweisung der Teileinzugsgebiete, Ermittlung des Fließgewässernetzes und Berechnung der Abflusskonzentration verwendet.

3.2 Boden

Maßgebend für die Bestimmung des Abflusses sind weiterhin die räumlich verteilten Informationen zu Bodencharakteristika des Untersuchungsgebiets, wobei ihre Auflösung und ihre Genauigkeit über Detaillierungsgrad und die Treffsicherheit der erzielten Ergebnisse entscheiden. Bodeneigenschaften bestimmen die Infiltrationsraten sowie die Aufteilung der Abflusskomponenten (Oberflächenabfluss, Interflow, Grundwasserabfluss). Die Identifikation der Bodentypen im Untersuchungsraum und ihre Einordnung in die verwendete Bodenklassifikation erfolgten auf Basis der digitalisierten FAO-Weltbodenkarte (**Bild 2**). Der Datensatz der Bodentypenverteilung basiert hierbei auf der Harmonized World Soil Database (HWSD), die die weltweit auftretenden Bodentypen und deren globale Verteilung darstellt [4]. Die HWSD ist eine 30-Winkelsekunden-Rasterdatenbank mit über 15 000 verschiedenen Bodenkartierungseinheiten.

Zur Berücksichtigung der Bodeneigenschaften wurden im Zuge der Modellparametrisierung zwei Tabellen aufgebaut, eine Bodenprofilabelle, die u. a. den Schichtaufbau des Bodens beschreibt und Verweise auf die Substrattabelle enthält. In der Substrattabelle sind die für die hydrologische Modellierung relevanten bodenphysikalischen Kennwerte zusammengetragen. Im

Projektgebiet wurden insgesamt sechs verschiedene Bodentypen definiert (**Bild 2**).

3.3 Landnutzung

Landnutzungsdaten stellen einen essentiellen Eingabedatensatz für die Bestimmung des Abflussverhaltens eines Flusseinzugsgebiets dar. Dies bezieht sich sowohl auf die Jahreswasserbilanzen als auch auf die Hochwasserentstehung bei sommerlichen Starkniederschlägen und auf das Niedrigwasser während der Trockenperioden.

Da für das Projektgebiet nur sehr grob strukturierte digitale Landnutzungsdaten vorlagen, wurde die Landbedeckung über das Einzugsgebiet aus großräumigen Vegetationskartierungen abgeleitet, die auf Satellitenbildern basieren. Für die Klassifizierung der Landnutzung wurden Landsat-8-Daten (USGS Earth Explorer) mit 11 Bändern eingesetzt. Der Bildklassifizierungsprozess umfasste die Umwandlung von Mehrband-Rasterbildern in ein Einband-Raster. Aus einzelnen Dateien wurde anschließend Multiband-Rasterbilder (GeoTIFF) erstellt, die zur Generierung der Landnutzungskarte verwendet wurden (**Bild 3**). Die entstandene Rasterdatei erlaubt die Unterscheidung von besiedelten Flächen, terrassierten Ackerlandflächen, Ackerland, Wald, Grünland und Wasserflächen. Die hydrologisch relevanten Eigenschaften unterschiedlicher Landnutzungen werden in der Datenbank verwaltet. Zur Berücksichtigung nutzungsbedingter Unterschiede in den Flächeneigenschaften werden den

im Untersuchungsgebiet vorkommenden Flächennutzungen Kennwerte zugeordnet.

3.4 Gewässernetz

Die Ableitung der Gewässerslängsprofile erfolgte auf der Grundlage des digitalen Geländemodells unter Verwendung GIS-basierter Reliefanalysen. In Verknüpfung mit den Ladsat-8-Satellitenbildern des Einzugsgebiets wurden die Wasserläufe abgeleitet, welche das Flussbett repräsentieren. Da die detaillierte Querschnittserhebung des Gewässernetzes meistens nur auf die WKA-Standorte und ihre unmittelbare Nähe begrenzt war, wurden die Höhendaten von DGM und die Satellitenbilder zur Erstellung der Querschnitte des Hauptstroms und der Nebenflüsse eingesetzt. Zu diesem Zweck wurde eine einfache lineare Interpolationsprozedur durchgeführt, die zwei verfügbaren Querschnitte unter Berücksichtigung der Höhenlagen des linken und rechten Uferbereichs miteinander verknüpft.

3.5 Meteorologische Daten

Als Eingangsdaten für die hydrologische Modellierung werden die Daten benötigt, die die Eingangs- und Ausgangsdaten der hydrologischen und energetischen Bilanzen bis zur Bodenoberfläche beschreiben. Dazu gehören vorrangig die Niederschlagsdaten, die Lufttemperatur, die relative Luftfeuchte, die Windgeschwindigkeit sowie die Globalstrahlung bzw. die relative Sonnenscheindauer.

Für die Modellierung wurden satellitenbasierte Niederschlagsmessungen verwendet, um die vorhandenen täglichen Stationsdaten zu disaggregieren. Hierfür wurde das Niederschlagsprodukt TRMM3B42 Version 7 verwendet [6]. Die räumliche Auflösung der TRMM-Daten ist 0,25° x 0,25° (im Bereich des Wuyang-Einzugsgebietes 28 km x 28 km), und die zeitliche Auflösung beträgt 3 h.

Die übrigen meteorologischen Eingangsdaten (Tagesmittelwerte) werden aus der Punktinformation auf das gesamte simulierte Einzugsgebiet durch die Thiessen-Polygon-Methode interpoliert.

4 Hydrologische Modellierung

Für die hydrologische Modellierung wurde die Software STORM.XXL [7] verwendet, die in den Bereichen Hydrologie und Wasserwirtschaft eingesetzt wird. Das Modell STORM ist ein deterministisches, flächendetailliertes, konzeptionelles Modell, dessen Modellansätze physikalisch begründet sind. Seine räumliche Gliederung basiert auf einer Einteilung des betrachteten Einzugsgebietes in Polygone ähnlicher Eigenschaftskombination (Flächen gleicher hydrologischer Prozessrelevanz), die als Ebene für die Simulation der Abflussbildungsprozesse dienen.

Die genauen Kenntnisse über den Ablauf der hydrologischen Prozesse in dem Einzugsgebiet des Wuyang-Flusses stellen

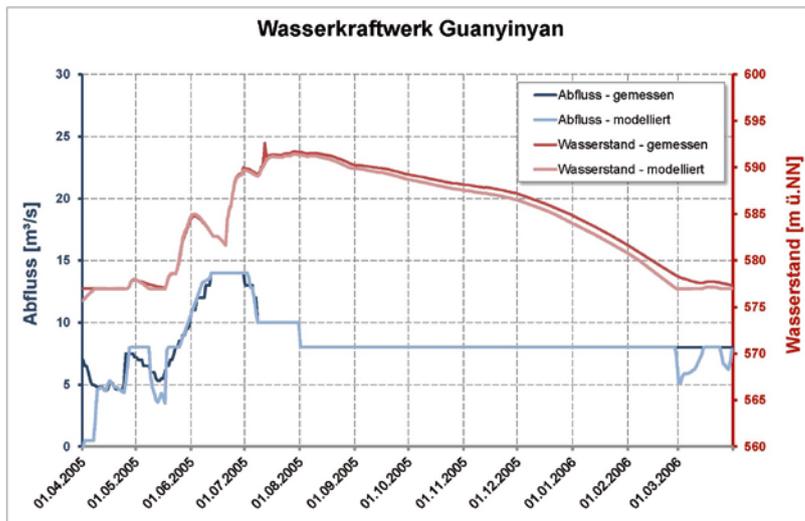


Bild 4: Gemessene und berechnete tägliche Abflüsse und Wasserstände an den Pegelstandorten Guanyinyan und Hongqi im Kalibrierungszeitraum 01.04.2005-31.12.2006

einerseits die Grundlage für die Strategieentwicklung für den Betrieb der einzelnen WKA und andererseits für die Optimierung der Kaskade dar. Die hydrologischen Prozesse in anthropogen stark beeinflussten Gebieten sind auf Grund der hydrologischen Gegebenheiten vor Ort schwer abzubilden. Vor allem die undokumentierten, kleinräumigen Wassermanagementmaßnahmen in den Nebenflüssen (Kleinwasserspeicher für die Reisfeldbewässerung, lokale Wasserentnahmestellen etc.), aber auch zum Teil grob strukturierte oder eine fehlende Datengrundlage erschweren eine exakte Abbildung des Abflussverhaltens des Untersuchungsgebiets. In der Projektregion ist die Landwirtschaft maßgeblich durch den Reisanbau geprägt, was eine exakte Bestimmung der Wasserbilanzen stark beeinflusst. Wichtige Herausforderung zur Optimierung des hydrologischen Einzugsgebietsmodells war die Entwicklung eines Steuerungselements zur Abbildung der auf den Reisanbauflächen ablaufenden Prozesse des Wasserhaushalts. Ein entsprechendes Modul wurde programmiert und in die Software STORM.XXL integriert [12].

Das Projektgebiet wird durch Karst beeinflusst, was durch sehr komplexe heterogene Fließ- und Speicherverhalten charakterisiert

Tabelle 1: Modelliertes Abflussvolumen und mittlere Jahresabflüsse für die Wasserkraftwerkstandorte; Simulationszeitraum: 2000-2016 (Quelle: [8])

Wasserkraftwerk	Abfluss [Mio. m³/a]	MQ [m³/s]
Liangchahe	127,4	4,0
Chuanxingbao	245,5	7,8
Yindiba	315,3	10,0
Guanyinyan	528,9	16,8
Zhugedong	1.000,4	31,7
Hongqi	1.143,2	36,2

ist. Dies erschwert die Modellierung, da die ansonsten überwiegend physikalisch basierte Beschreibung der einzelnen Kompartimente des Bodenwasserhaushalts in Karstgebieten praktisch nicht möglich ist. Vor allem die Unsicherheiten bei der Bestimmung der unterirdischen Abflüsse aus Karstgebieten stellen eine große Fehlerquelle dar. Eine mäßige bis starke Klüftung und Verkarstung einiger Teile des Untersuchungsgebiets kann sich im Rahmen der Wasserhaushaltsmodellierung durch zu hohe, simulierte Abflüsse auswirken [8]. In diesen Bereichen wurde ein vereinfachter Ansatz zur Nachbildung der karstbedingten Wasserabführung eingesetzt. Um die vermutlich auf Karsteinflüsse zurückgehenden Abflussverluste in den betroffenen Teileinzugsgebieten zu parametrisieren, wurde der Basisabfluss im Bodenmodell während des Kalibrierungsprozesses optimiert.

Für Kalibrierung und Validierung des Modells standen die an den WKW-Standorten Liangchahe, Guanyinyan und Hongqi (Bild 1) gemessenen Abflussgrößen und die Wasserspiegelverläufe in den jeweiligen Wasserreservoirs zur Verfügung. Mit dem Modell könnten die innerjährliche Dynamik des Abflusses der Wuyang sowie die Wasserstände in den drei Reservoirs zufriedenstellend abgebildet werden (Bild 4). Der Unterschied in den Wassermengen ist offensichtlich eine Folge der geringen Auflösung der Durchflussmessungen an den jeweiligen Messstellen.

Mit dem kalibrierten Modell wurde anschließend eine Langzeitsimulation durchgeführt. Dabei wurden sowohl die Wasserbilanzen als auch die Abflüsse für den Zeitraum 2000-2016 in Tagesschritten modelliert (Tabelle 1). Die generierten Abflussreihen dienten als Eingangsdaten für das Kaskadenmodell CasOpt [9]. Zudem wurde für die Auslegung der WKA die Bestimmung der Dauerlinien in das hydrologische Programm STORM integ-

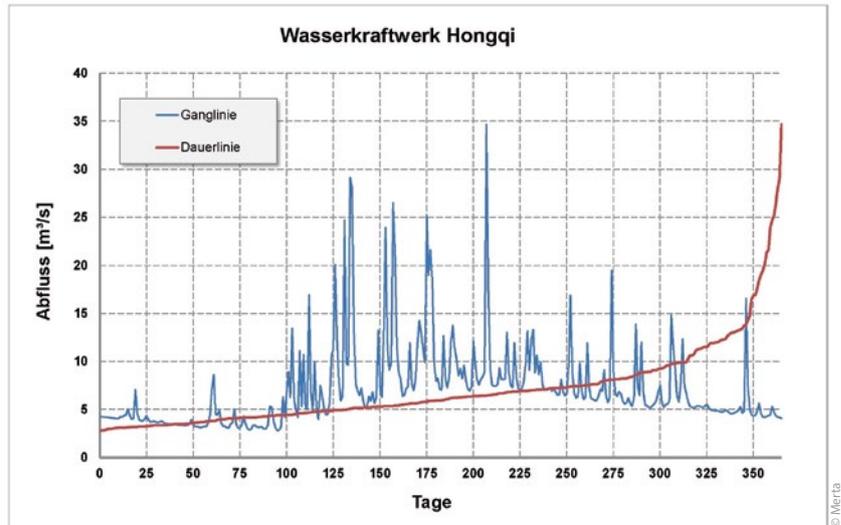


Bild 5: Abflussganglinie und Dauerlinie für die Hongqi-WKA; langjähriger Durchschnitt

riert. Zur Ermittlung des technischen Potenzials der WKA-Kaskade am Wuyang-Fluss wurden die Durchflussdauerlinien für alle Standorte ermittelt und untersucht. Eine beispielhafte langjährige Dauerlinie für den Standort Hongqi zeigt Bild 5, welche auch für die Auslegung der Kraftwerke verwendet wurde [10]. Die ermittelten Potenziale wurden anschließend hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit, ihrer Wirtschaftlichkeit sowie der Umweltverträglichkeit [11] im weiteren Verlauf des Projektes bewertet.

5 Kopplung des Softwarewerkzeug CasOpt mit dem hydrologischen Modell

Mit den Fraunhofer IOSB wurde die Kopplung des zur energetischen Optimierung eingesetzten Kaskadenmodells (CasOpt) mit dem hydrologischen Einzugsgebietsmodell STORM realisiert (Bild 6). Die Datenübergabe zwischen den beiden Modellen erfolgt via IP-Schnittstelle. Die Steuerung der Kaskade ermöglicht sowohl die energetische Optimierung als auch die Basis für die Integration einer zukünftig vorstellbaren Überflutungsvorhersage. Dies ist nur bei gekoppelter Modellierung möglich [12].

Mit den Projektpartnern wurden alle Details der Datenübergabe besprochen sowie die Schnittstelle für die erforderliche Datenauswertung fertig gestellt und getestet. Es wurden die genauen Steuerungsmodalitäten der Kaskadensteuerung erarbeitet. Die vollständige Steuerung am Beispiel des Wuyang-Flusses wurde den chinesischen Partnern im Oktober 2017 zur Verfügung gestellt.

Durch Kopplung mit den Softwaretool CasOpt wurden hydrologische und energietechnische Simulationen miteinander verbunden. Das führte zu einer ganzheitlichen Optimierung hinsichtlich der hydrologischen und energietechnischen Zielstellungen. Darauf aufbauend erfolgten Szenarienrechnungen,

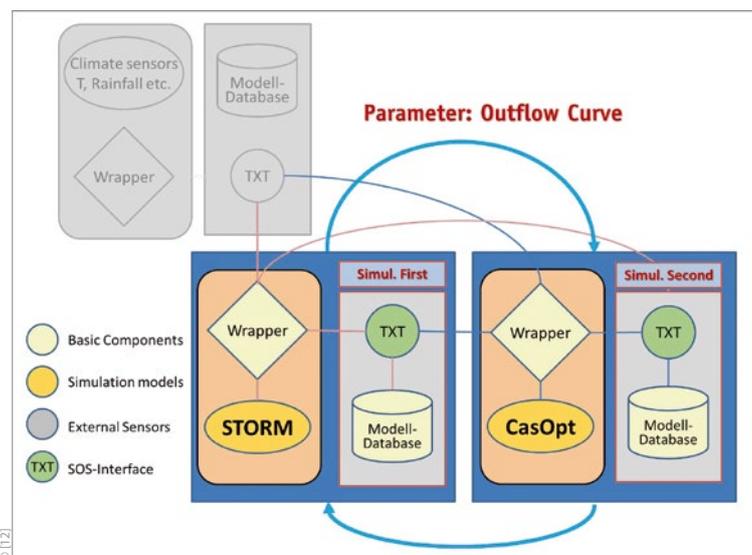


Bild 6: Schematische Darstellung der Kopplung des hydrologischen Modells mit dem Kaskaden-Modell

mit dem Ziel zu prüfen, inwieweit das Verbinden von mehreren KWK zu virtuellen Kraftwerken in verschiedenen räumlichen Skalierungen zur Verbesserung der Energieversorgung beitragen kann und welchen Nutzen die Investoren daraus ziehen können. Daraus wurden Managementstrategien für die KWK und KWK-Kaskaden abgeleitet, die optimal für das Programm SHSF sind und die darüber hinaus Beiträge zu einer effizienten Energieversorgung in China über das Programm SHSF liefern. Diese Strategien können auch auf andere KWK – in China sind das Kraftwerke bis 50 MW Leistung – übertragen werden.

6 Fazit

Es kann festgehalten werden, dass nach ausgiebiger Recherche ein Datenstand erreicht wurde, um hydrologische Einzugsgebietsmodelle zu erstellen und zu kalibrieren. Damit konnten für das Projekt erforderliche Ergebnisse (Abflussganglinien, Dauerlinien, Niedrigwasserstände, Hochwasserabflüsse und Wasserbilanzen) aus diesem Einzugsgebiet berechnet werden. Für zukünftige Projekte sind verbesserte und aktualisierte Datenquellen durchaus sinnvoll und zielführend.

Die effiziente Steuerung und erfolgreiche Optimierung von WKA wird in der nächsten Zukunft stark an Bedeutung gewinnen. Mit der hier vorgestellten Methode kann nach Optimierung der Steuerregeln einzelner Anlagen über die Prognose der Abflussmenge in die Stauanlage die Stromproduktion der Kaskade effizient optimiert werden. Die Optimierung kann für weitere Funktionen, wie Speicherung von Wasser für die Bewässerungszwecke oder der Funktion des Hochwasserschutzes, erfolgen.

Die Internet-Präsenz auf www.happishp.com bietet langfristigen Zugriff auf die im Projekt erarbeiteten Leitlinien.

Dank

Die diesem Artikel zu Grunde liegende Forschung wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des deutsch-chinesischen Forschungsprojekts „HAPPI – Kleinwasserkraftwerke: Bewertung des Potenzials für Klimaschutz und Verbesserung durch intelligente Technologien“ gefördert (BMBF-Förderkennzeichen 02WCL1307). Die Verfasser

ser danken auch den Partnern und Behörden der Volksrepublik China für die Bereitstellung der hydrologischen bzw. meteorologischen Daten.

Autoren

Dr.-Ing. Mariusz Merta

Dr.-Ing. Harald Sommer

Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH

Rennbahnallee 109a, 15366 Hoppegarten

m.merta@sieker.de

h.sommer@sieker.de

Literatur

- [1] Rauschenbach, T.: Bewertung und Verbesserung von Kleinwasserkraftwerken in China. In: *WasserWirtschaft* 109 (2019), Heft 6, S. 12-15.
- [2] ASTER (Hrsg.): ASTER Global Digital Elevation Map Announcement (<https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>, Abruf 01.01.2019).
- [3] ASTER GDEM VT (Hrsg.): ASTER Global DEM Validation Summary Report (www.ersdac.or.jp/GDEM/E/image/ASTERGDEM_ValidationSummary-Report_Ver1.pdf, Abruf 01.01.2019).
- [4] FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC (Hrsg.): Harmonized World Soil Database (version 1.1). FAO, Rom, Italien; IIASA, Laxenburg, Österreich, 2009.
- [5] FAO SOILS PORTAL: Harmonized World Soil Database v 1.2. (www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/, Abruf 01.01.2019).
- [6] NASA (Hrsg.): Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM), 2015 (<http://pmm.nasa.gov/data-access/data-downloading>, Abruf 01.01.2019).
- [7] Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH (Hrsg.): STORM, Software für die Modellierung wasserwirtschaftlicher Systeme, 2017 (www.sieker.de/de/produkte-und-leistungen/product/storm-16.html, Abruf 01.01.2019).
- [8] Gocht, M.; Tynior, R.; Wunderlich, C.: Konstruktive und geotechnische Aspekte kleiner Wasserkraftwerke in China. In: *WasserWirtschaft* 109 (2019), Heft 6, S. 29-35.
- [9] Karimanzira, D.; Rauschenbach, T.: Optimale Betriebsführung von Kleinwasserkraftwerks-Gruppen. In: *WasserWirtschaft* 109 (2019), Heft 6, S. 43-50.
- [10] Träbing, K.; Dickel, S.; Theobald, S.: Bauwerkshydraulik und Standortoptimierung für Kleinwasserkraftwerke in China. In: *WasserWirtschaft* 109 (2019), Heft 6, S. 36-42.
- [11] Tettenborn, F.; Sartorius, C.: Nachhaltigkeitsbewertung für Kleinwasserkraftwerke in China. In: *WasserWirtschaft* 109 (2019), Heft 6, S. 16-21.
- [12] Sommer, H.: Schlussbericht zum FuE-Verbundvorhaben HAPPI des Projektpartners Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH, 2018.

Mariusz Merta and Harald Sommer

Hydrological modelling for optimization of small hydropower plant cascades

The hydrological modelling of the water supply in the river basin is of great importance in the planning and optimization of hydropower plants. They are often integrated into complex cascades and constitute a significant part of electrical production due to the natural inflow. However, in many parts of the world the necessary data are missing. The central question of this study is, therefore: is it possible to model the discharge regime of a catchment area on the basis of publicly available data sources in order to ensure site evaluation and optimize energy production of hydropower plants.

 SpringerProfessional.de

Abflussregime

Patt, H.: *Hydrologische Grundlagen*. In: *Naturnaher Wasserbau*. 5. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018. www.springerprofessional.de/link/16281426

Kollmann, J.: *Fließgewässer*. In: *Renaturierungsökologie*. Berlin Heidelberg: Springer Spektrum, 2019. www.springerprofessional.de/link/16486228