

# Methode zur Suszeptibilitätsanalyse für Massenbewegungen im regionalen Maßstab mit Hilfe von GIS und statistischer Analyse im Bereich des Drei-Schluchten-Stausees, V.R China

Landslide susceptibility analysis in regional scale by GIS and statistical analyses for the Three Gorges Reservoir in P.R. China

Markus Schleier<sup>1</sup>, Joachim Rohn<sup>1</sup>, Renneng Bi<sup>1</sup>, Dominik Ehret<sup>2</sup>, Wei Xiang<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Angewandte Geologie, GeoZentrum Nordbayern, Universität Erlangen-Nürnberg  
Dipl.-Geol. Markus Schleier, markus.schleier@gzn.uni-erlangen.de

<sup>2</sup> Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, Regierungspräsidium Freiburg

<sup>3</sup> Three Gorges Geohazard Research Center, China University of Geosciences, Wuhan, P.R. China

## Zusammenfassung

Die Drei-Schluchten-Stauanlage ist das weltweit größte Wasserkraftwerk. Durch den Aufstau des Stausees wird ein großflächiges Ökosystem stark beeinflusst. Bedeutende Auswirkungen sind ein starker Landnutzungswandel, sowie eine Erhöhung der Geogefahren, z.B. Massenbewegungen. Im Rahmen des interdisziplinären „YANGTZE-Projekt“ wurde das Xiangxi Einzugsgebiet als Teil dieses Ökosystems bezüglich der Veränderungen (Erosion, Stoffeinträge, Landnutzungswandel und Massenbewegungen) untersucht. Das Teilprojekt „Gefährdungsanalyse von Hangrutschungen im Einzugsgebiet des Xiangxi-Flusssystem“ untersuchte die auftretenden Massenbewegungen und erstellte eine einfach anwendbare Methode zur regionalen Abschätzung der Suszeptibilität. Es wurde für das Arbeitsgebiet ein Hangbewegungsinventar erstellt und der Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Massenbewegungen und deren Einflussfaktoren (Lithologie, Hangneigung, Hangkrümmung, Abstand zu Fließgewässern und Landnutzung) statistisch analysiert. Die Ergebnisse wurden zur Gewichtung dieser Faktoren im Rahmen einer GIS-basierten Suszeptibilitätsberechnung (Index-Methode) herangezogen. Das Ergebnis des Modells zeigt mit 89% richtiger Klassifikation der Massenbewegungen tendenziell eine regionale Anwendbarkeit.

**Schlüsselworte:** Massenbewegungen, Suszeptibilität, GIS-Analysen, Drei-Schluchten-Stausee, V.R. China

## Abstract

The Three Gorges Dam is the worlds largest hydroelectric powerplant. Due to impoundment of the reservoir, a large ecosystem is highly affected. Important consequences are an intense land use change and an increase of geohazards, e.g. landslides. In framework of the interdisciplinary Sino-German “Yangtze-Project” the Xiangxi catchment as part of this ecosystem was investigated concerning the consequences according to erosion, element inputs, land use change and mass movements. Within the sub-project “landslides” („Gefährdungsanalyse von Hangrutschungen im Einzugsgebiet des Xiangxi-Flusssystem“) the mass movements were investigated and a method to assess the landslide susceptibility in regional scale was applied. For the study area a landslide inventory was established and the relation between landslide occurrence and conditioning factors, like e.g. lithology, slope angle, aspect, curvature, distance to the drainage system and land use was statistically analysed by Frequency-Ratio Method. As a next step the landslide susceptibility was determined by use of heuristic GIS methods (Index Method). Therefore the conditioning factors have to be weighted with indices according to their importance for landslide occurrence. To make the calculation more objective, the results of the statistical analysis were used to set the indices. The overall performance of the applied model shows that 89% of the mapped landslides are within the area classified with high and very high susceptibility. The results show that this method is applicable to assess landslide susceptibility in regional scale.

**Keywords:** mass movements, landslide susceptibility, GIS-analyses, Three Gorges Reservoir, P.R.China

## 1 Einleitung

Der Bau und Betrieb eines Staudammes hat große Auswirkungen auf das umgebende Ökosystem (BAXTER 1977). Der Betrieb der Drei-Schluchten-Stauanlage und besonders der damit einhergehende Aufstau des Yangtze Flusses und seiner Zuflüsse (Drei-Schluchten-Reservoir) und die jährlichen Wasserspiegelschwankungen von ca. 30m haben das Öko-

system großflächig stark beeinflusst und werden es auch in Zukunft beeinflussen. Im Rahmen des interdisziplinären Deutsch-Chinesischen Forschungsprojektes „Nachhaltige Bewirtschaftung des neu geschaffenen Ökosystems am Drei-Schluchten-Staudamm“ (YANTZE-Projekt) wurden die unterschiedlichen Auswirkungen bezüglich Erosion, Stoffeinträge, Landnutzungswandel und Massenbewegungen untersucht (SUBKLEW et al. 2010 und SCHOLTEN &



SCHÖNBRODT-STITT 2012). Als Untersuchungsgebiet wurde das gesamte Xiangxi Einzugsgebiet, als direkter Zufluss des Yangtze ausgewählt.

Massenbewegungen gehören im Drei-Schluchten-Reservoir zu den Hauptproblemen seit Beginn des Aufstaus (HE et al. 2008) und verursachten bereits große Schäden (KALLEN et al. 2006). In vielen Bereichen wurden im Rahmen des ersten Aufstaus die Aktivierung neuer und Reaktivierung alter Massenbewegungen beobachtet (HUANG & CHEN 2007 und WANG et al. 2004).

Das Teilprojekt „Gefährdungsanalyse von Hangrutschungen im Einzugsgebiet des Xiangxi-Flussystems“ untersuchte die Auftretenden Massenbewegungen (EHRET et al. 2012). Es wurde deren räumliche Ausdehnung erfasst und ihre Einflussfaktoren statistisch analysiert. Ein Ziel war es, die Suszeptibilität für Massenbewegungen regional abzuschätzen. Hierfür wurden die hier vorgestellte GIS-basierte Methode, sowie eine Methode mit Hilfe künstlicher neuronaler Netze (BI et al. 2013, dieser Tagungsband) angewendet.

## 2 Arbeitsgebiet

Das Xiangxi Einzugsgebiet liegt in Zentral China in der Provinz Hubei und umfasst eine Fläche von ca. 3209 km<sup>2</sup>. Der Xiangxi ist ein nördlicher Zufluss des Yangtze und hat seine Mündung ca. 40km oberhalb der Staumauer. (Abb. 1). Das Einzugsgebiet reicht von 62m N.N. (Einmündung in den Yangtze) bis 3078m N.N. (Mt. Shennongjia) und hat ein relativ steiles Relief.

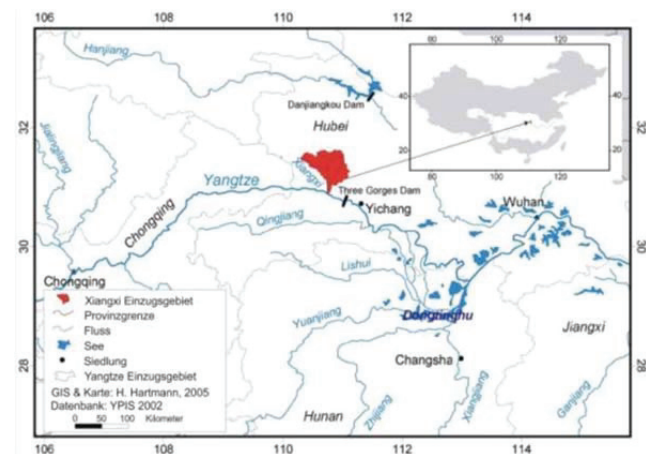


Abb. 1: Lage des Xiangxi Einzugsgebietes (rot), nach YPIS (2002)

Fig. 1: Location of Xiangxi catchment (red) after YPIS (2002)

Der südliche Bereich des Einzugsgebietes (von der Mündung ca. 30 km flussauf bis zur Stadt Gaoyang) ist direkt vom Aufstau des Drei-Schluchten-Reservoirs betroffen (Abb. 2). Der Xiangxi-Fluss bildet hier einen Stausee, der direkt von den jährlichen Wasserspiegelschwankungen um 30m betroffen ist und einen Höchststand von 175 m N.N. aufweist.

Im Arbeitsgebiet sind Präkambrische Granite und Gneise, sowie Paläozoische und Mesozoische Sedimentgesteine (vorwiegend Karbonate und Sand-, Silt- und Tonsteine) ausgebildet (Abb. 2 und Tab. 1).

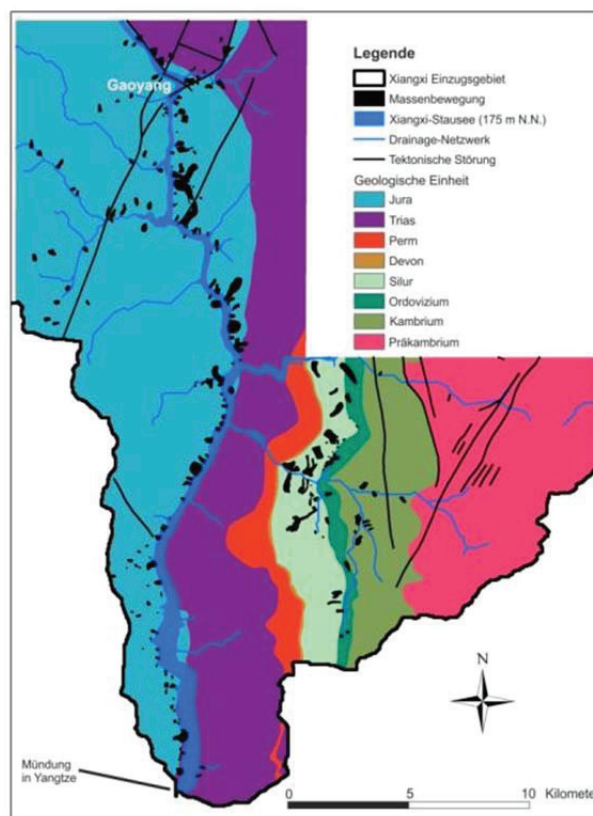


Abb. 2: Geologische Karte des südlichen, direkt vom Aufstau betroffenen Bereiches des Xiangxi Einzugsgebietes.

Fig. 2: Geological map of the southern part of Xiangxi catchment which is directly affected by the impoundment of the reservoir.

Tab. 1: Lithologien der Geologische Einheiten.

Tab. 1: Lithologies of geological units.

Geologische Einheit	Lithologie
Jura	Sandstein, Siltstein, Tonstein Wechselfolgen
Trias	Karbonatgesteine, untergeordnet Sandsteine
Perm	Kalkstein, untergeordnet Sandstein
Devon	Kalkstein, untergeordnet Sandstein
Silur	Siltstein, Tonstein Wechselfolgen
Ordovizium	Karbonatgesteine, untergeordnet Tonsteine
Kambrium	Karbonatgesteine, untergeordnet Siltsteine
Präkambrium	Granite und Gneise

## 3 Methoden

Für die Erstellung des GIS-basierten Modells zur Suszeptibilitätsberechnung wurde der südliche, direkt vom Aufstau beeinflusste Teil des Xiangxi-Einzugsgebietes herangezogen. (Abb. 2)

### 3.1 Statistische Analyse

Während mehrerer Geländeuntersuchungen wurden die auftretenden Massenbewegungen und die Lithologien in ihrer räumlichen Lage erfasst und ein Hangbewegungs-

ventar, sowie eine geologische Karte erstellt. Auf Grundlage des digitalen Geländemodells wurden verschiedene topographische Parameter (Hangneigung, Hangausrichtung, Hangkrümmung) ermittelt. Daten zur Landnutzung wurden vom Teilprojekt „Landnutzungsklassifizierung und Analyse der Vulnerabilität von Risikoelementen bei Massenbewegungen im Einzugsgebiet des Xiangxi“ (SEEBER et al. 2012) bereitgestellt.

Um schließlich den Einfluss dieser Faktoren auf das Auftreten von Massenbewegungen zu ermitteln, wurden statistische Analysen nach der Frequenzverhältnis-Methode vorgenommen (EHRET et al. 2011, EHRET et al. 2012).

$$F_r MM = \frac{a}{b} = \frac{A_{MM, C_i}}{A_{MM, tot}} \bigg/ \frac{A_{C_i}}{A_{tot}}$$

- Mit: a : Massenbewegungs-Dichte für Klasse i  
 A<sub>MM, C<sub>i</sub></sub> : Fläche von Massenbewegungen in Klasse i  
 A<sub>MM, tot</sub> : Gesamte Fläche von Massenbewegungen  
 b : Flächenanteil der Klasse  
 A<sub>C</sub> : Fläche von Klasse i  
 A<sub>tot</sub> : Gesamte Fläche

Die Berechnung liefert Zahlenwerte, die umso größer sind, umso höher die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Massenbewegungen ist. Ein Frequenzverhältnis von Eins bedeutet normale, Null sehr geringe und ein Wert größer Eins erhöhte Wahrscheinlichkeit.

### 3.2 Suszeptibilitätsberechnung

Die GIS-basierte Berechnung der Suszeptibilität ist eine Raster-basierte Berechnung, d.h. das Arbeitsgebiet wird in ein Raster mit definierter Zellgröße unterteilt und für jede einzelne Rasterzelle wird die Suszeptibilität berechnet. Für die Berechnungen wurde eine Zellgröße von 10 m x 10 m gewählt.

Die Berechnung der Suszeptibilität nach der Index-Methode erfolgt mit GIS durch Verschnitt der unterschiedlichen Datenebenen (Einflussfaktoren) analog der bei RUFF & CZURDA (2008) und RUFF & ROHN (2008) angewendeten Formel:

$$S_{ges} = S_{F1} + S_{F2} + S_{F3} + S_{F4} + \dots$$

- Mit: S<sub>F1,2,3,4...</sub> = I<sub>1</sub> \* I<sub>2</sub> \* I<sub>3</sub>  
 I<sub>1</sub> : Index für Gewichtung einer Klasse eines Faktors  
 I<sub>2</sub> : Index für Gewichtung eines Faktors in einer Gruppe  
 I<sub>3</sub> : Index für Gewichtung einer Gruppe

Die Zuweisung der Indizes erfolgt in drei Ebenen. I<sub>1</sub>) Die Werte eines jeden Einflussfaktors, so z.B. verschiedene Hangneigungsbereiche beim Faktor Hangneigung werden klassifiziert. Jede Klasse erhält entsprechend ihres Einflusses einen Index, wobei ein höherer Wert einen höheren Einfluss kennzeichnet. I<sub>2</sub>) Jeder Faktor erhält einen Index entsprechend seines Einflusses innerhalb einer thematischen Gruppe, wobei die Summe der Indizes Eins ergibt. I<sub>3</sub>) Jede thematische Gruppe erhält ebenfalls entsprechend ihres Einflusses einen Index. Auch hier ist die Summe der Indizes

gleich Eins. Die Zuweisung der Indizes erfolgt in GIS manuell. Da dieser Schritt normalerweise sehr subjektiv ist, und von der Einschätzung des Bearbeiters abhängt, wurden für die Indizierung die Ergebnisse der Frequenzverhältnis-Analyse herangezogen, um die Objektivität der gesamten Methode zu erhöhen. Die für die Berechnung verwendeten Einflussfaktoren und die zugewiesenen Indizes sind in Tabelle 2 aufgezeigt.

Tab. 2: Input Parameter der Suszeptibilitätsberechnung

Tab. 2: Input parameters for susceptibility analysis

thematische Gruppe	Einflussfaktor	Werteklasse	Index		
			I1	I2	I3
Topographie	Hangneigung [°]	0 bis 10	0,4	0,5	0,4
		10 bis 20	1		
		20 bis 30	0,8		
		30 bis 40	0,6		
		40 bis 50	0,4		
		50 bis 60	0,1		
		60 bis 70	0,1		
		70 bis 80	0,1		
	80 bis 90	0,1			
	Exposition	horizontal	0	0,3	
		nord	0,1		
		nordost	0,2		
		ost	0,4		
		südost	0,6		
		südost	0,8		
		südwest	1		
		west	0,4		
	nordwest	0,1			
	Hangkrümmung	konkav	0,8	0,2	
		eben	0,6		
		konvex	0,4		
Geologie	Alter (Lithologie)	Fluss	0	1	0,4
		Jura	0,8		
		Trias	0,2		
		Perm	0,1		
		Devon	0,4		
		Silur	1		
		Ordovizium	0,4		
		Kambrium	0,2		
Präkambrium	0,1				
Hydrologie	Abstand zu Fluss [m]	100	1	1	0,2
		250	0,8		
		500	0,6		
		750	0,4		
		1000	0,2		
		>1000	0,1		

Durch Multiplikation der einzelnen Indizes errechnet sich die Suszeptibilität für einen bestimmten Faktor. Die Gesamtsuszeptibilität errechnet sich schließlich aus der Summe der einzelnen Faktoren-Suszeptibilitäten.

Mit dieser Methode werden Werte für die Suszeptibilität zwischen Null und Eins erhalten. Mit Hilfe der Klassifikationsmethode „natürliche Grenzen“ wurde der Datensatz mit GIS in die fünf Suszeptibilitätsklassen sehr gering, gering, mittel, hoch und sehr hoch eingeteilt.



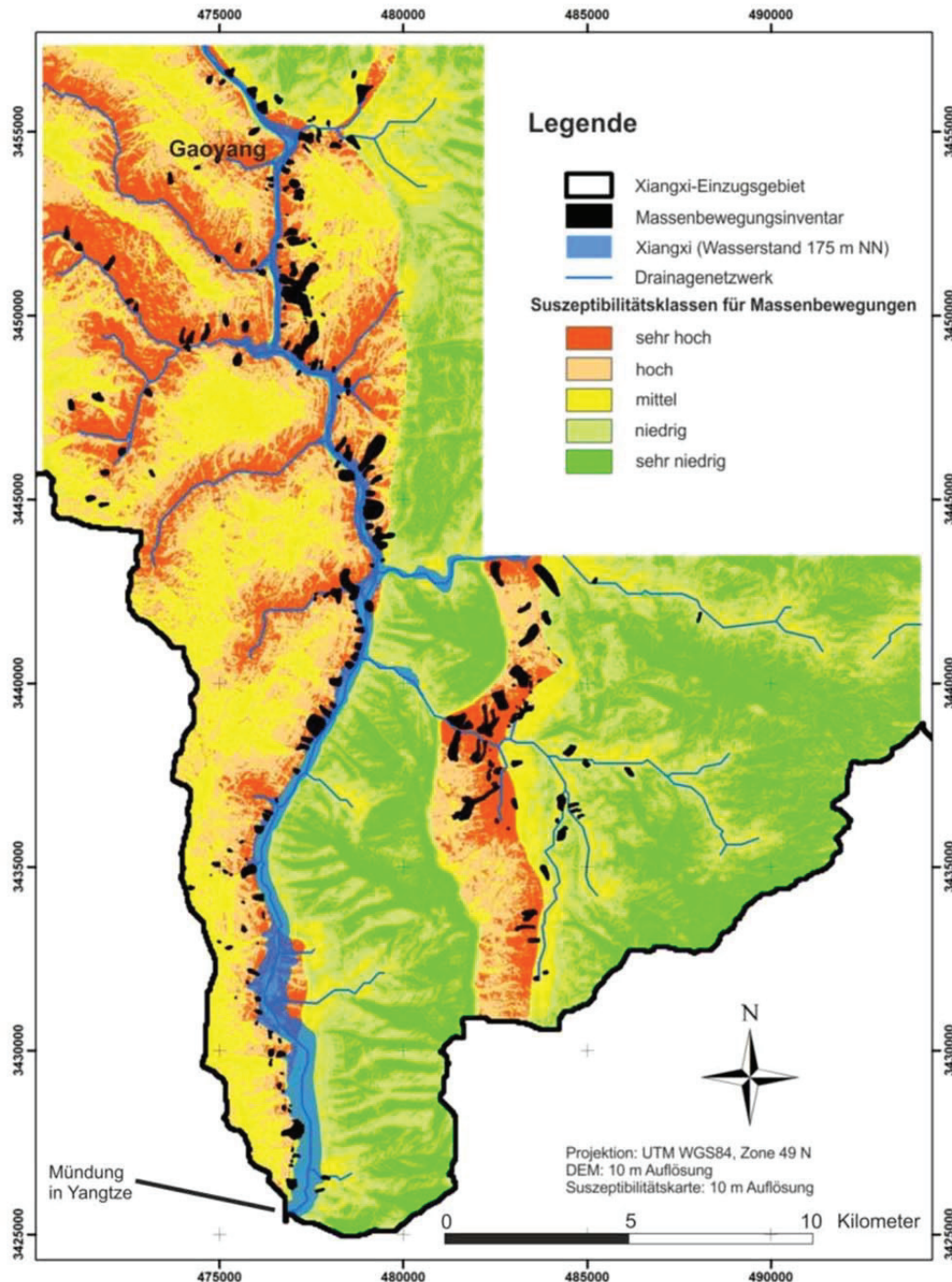


Abb. 3: Suszeptibilitätskarte für Massenbewegungen im südlichen Bereich des Xiangxi Einzugsgebietes.  
Fig. 3: Landslide susceptibility map of the southern part of Xiangxi catchment.

#### 4 Ergebnis: Suszeptibilitätskarte

Das Ergebnis der Suszeptibilitätsberechnung und die Einteilung in Suszeptibilitätsklassen für den südlichen Teil des Xiangxi Einzugsgebietes ist in Abb. 3 in Form einer Suszeptibilitätskarte dargestellt.

Die räumliche Verteilung zeigt stark den großen Einfluss der Lithologie, aber auch den Einfluss der Fließgewässer auf das Auftreten von Massenbewegungen. Vergleicht man die räumliche Verteilung der kartierten Massenbewegungen mit

der räumlichen Verteilung der unterschiedlichen Suszeptibilitätsklassen, so lässt sich feststellen, dass 89% der bekannten Massenbewegungen in Bereichen mit hoher/sehr hoher Suszeptibilität auftreten.

#### 5 Zusammenfassung

- Die Methode ist relativ schnell durchführbar und ist für eine regionale Abschätzung der Suszeptibilität für Massenbewegungen anwendbar.

- Für eine detaillierte Raumplanung ist diese Methode zu ungenau und auch nicht differenziert genug (verschiedene Typen von Massenbewegungen). Dies kann nur durch Einzelgutachten geleistet werden.
- Die Qualität (räumliche Auflösung) der Eingabeparameter, speziell der Topographie als Grundinformation, aus der weitere Parameter abgeleitet werden, und der Lithologie als Haupteinflussfaktor (speziell Verteilung Locker- und Festgestein) ist der größte limitierende Faktor für die Erkennungswahrscheinlichkeit (räumliche Auflösung) der Berechnung.
- Durch Einsatz von Fernerkundungsmethoden (z.B. hoch auflösende Satellitendaten und luftgestütztes Laserscanning) kann die Datengrundlage (Eingabeparameter) und somit auch die Erkennungswahrscheinlichkeit der Berechnung verbessert werden.

## Danksagung

Die Autoren danken dem BMBF für die Finanzierung der Arbeiten im Rahmen des YANGTZE-Projekt: „Nachhaltige Bewirtschaftung des neu geschaffenen Ökosystems am Drei-Schluchten-Staudamm“ (Fördernummer 03 G 0669). Weiterhin danken wir allen Projektpartnern für die Zusammenarbeit und wissenschaftliche Diskussion.

## Literatur

- BAXTER, R.M. (1977): Environmental Effects of dams and impoundments. – *Annual Review of Ecology and Systematics*, 8: 255-283.
- BI, R., ROHN, J., SCHLEIER, M., XIANG, W. & EHRET, D. (2013): Landslide recognition and ground truth in Xiangxi area, China. – Veröff. 19. Tagung für Ingenieurgeologie, München 13.-16. März 2013, diese Ausgabe.
- EHRET, D., ROHN, J., BI, R., XIANG, W. & SCHLEIER, M. (2011): Suszeptibilitäts-Analysen für Massenbewegungen im Gebiet des Drei-Schluchten-Stausees, V.R. China. – Veröff. 18. Tagung für Ingenieurgeologie, Berlin 16.-19. März 2011, 85-91.
- EHRET, D., SCHLEIER, M., BI, R., XIANG, W. & ROHN, J. (2012): Gefährdungsanalyse von Hangrutschungen im Einzugsgebiet des Xiangxi (Drei-Schluchten-Staudamm). – In: Scholten, T. & Schönbrodt-Stitt, S. (2012, Hrsg.): *Umweltforschung im Drei-Schluchten-Ökosystem in China. Ergebnisse der Forschungsarbeiten zur Risikoabschätzung von Bodenerosion, Hangrutschungen und Landnutzungswandel.* – Tübinger Geographische Studien, 151: p.140-175. Geographisches Institut der Universität Tübingen. ISBN 978-3-88121-089-8.
- HE, K.; LI, X. & YAN, X. (2008): The landslides in the Three Gorges Reservoir Region, China and the effects of water storage and rain on their stability. – *Engineering Geology*, 55: 55-63.
- HUANG, B. & CHEN, X. (2007): Deformation failure mechanism of Baijiabao landslide in Xiangxi River Valley. – *China Journal of Geotechnical Engineering*, 29(6): 938-942.
- KALLEN, D., XIANG, W., EHRET, D. & ROHN, J. (2006): Landslides at Qingjiang river in the downstream area of Shuibuya dam site, China. – *Journal of China University of Geosciences*, 17 (2): 158-162.
- RUFF, M. & CZURDA, K. (2008): Landslide susceptibility analysis with a heuristic approach in the Eastern Alps (Vorarlberg, Austria). – *Geomorphology*, 94 (3-4): 314-324.
- RUFF, M. & ROHN, J. (2008): Susceptibility analysis of slides and rockfall: an example from the Northern Calcareous Alps (Vorarlberg, Austria). – *Environmental Geology*, 55 (2): 441-452.
- SCHOLTEN, T. & SCHÖNBRODT-STITT, S. (2012, Hrsg.): *Umweltforschung im Drei-Schluchten-Ökosystem in China. Ergebnisse der Forschungsarbeiten zur Risikoabschätzung von Bodenerosion, Hangrutschungen, diffusen Stoffeinträgen und Landnutzungswandel.* – Tübinger Geographische Studien, 151. Geographisches Institut der Universität Tübingen. ISBN 978-3-88121-089-8.
- SEEBER, C., WIEGAND, M., XIANG, W. & KING, L. (2012): Landnutzungsklassifizierung und Analyse der Vulnerabilität von Risikoelementen bei Massenbewegungen im Einzugsgebiet des Xiangxi. – In: Scholten, T. & Schönbrodt-Stitt, S. (2012, Hrsg.): *Umweltforschung im Drei-Schluchten-Ökosystem in China. Ergebnisse der Forschungsarbeiten zur Risikoabschätzung von Bodenerosion, Hangrutschungen, diffusen Stoffeinträgen und Landnutzungswandel.* – Tübinger Geographische Studien, 151: p.84-139. Geographisches Institut der Universität Tübingen. ISBN 978-3-88121-089-8.
- SUBKLEW, G., ULRICH, J., FÜRST, L. & HÖLTKEMEIER (2010): Environmental Impacts of the Yangtze Three Gorges Project: An Overview of the Chinese-German Research Cooperation. – *J. of Earth Sci.*, 21 (6): 817-823.
- WANG, F. W.; ZHANG, Y. M.; HUO, Z. T.; MATSUMOTO, T. & HUANG, B. L. (2004): The July 14, 2003 Qiangjiangping Landslide, Three Gorges Reservoir, China. – *Landslides*, 1(2): 157-162.
- YPIS (2002): Yangtze Project Information System. Unpublished Information System. – Center for International Development and Environmental Research, Justus Liebig University Giessen.