

Probabilistic prediction of karst water inflow during construction of underground structures

Probabilistische Prognose von Karstwasserzutritten beim Bau von Untertagebauwerken

Various methods have been developed in recent decades to predict hazards associated with karst voids in underground construction. Common to all these methods is that the predicted range of water inflow is often insufficient for the purpose of implementing the planned construction works. This is usually due to an incomplete knowledge of the karst conduit system within a project area, making it difficult to predict the position and characteristics of karst voids. The method presented in this paper permits a robust prediction of karst water inflow. It is based on a combination of stochastically generated, pseudo-genetic karst conduit systems and hydraulic modelling of the hydrogeological conditions using a Monte Carlo approach. This approach facilitates a plausible estimation of the expected range of karst-induced water inflows and also enables the probability of encountering a karst voids. to be determined. The predictions allow for differentiated treatment of the hazards associated with karst water during the construction and operation phase of underground structures. In concrete terms, this relates to the planning and implementation of exploratory measures and ground-improvement measures, the design of the dewatering system and its monitoring during the construction and operation phase.

Keywords Tunnelling; karstified rock mass; karst water inflow; karst water inrush; prognosis; construction and operation phase

1 Introduction

From a geotechnical perspective, carbonate rocks generally offer good to excellent conditions for underground construction. However, when karstified, carbonate rocks are often associated with hazards that occur in other rock types only to a limited extent, if at all, e.g. [1–3]. When a karst voids is encountered, there is a risk of significant water inflows or even massive water inrushes of several cubic metres per second with a sediment load that can be substantial enough to flood the tunnel mudflow like, e.g. [4, 5]. The resulting hazard scenarios can directly impact both the construction project during the construction and operation phase, e.g. by flooding the tunnel, and the environment, e.g. by causing springs to run dry. The hazards relate to the distribution and characteristics of the karst voids and the prevailing hydrogeological conditions. They can result in technical complications with corresponding additional costs and delays, impairment of workplace safety, impairment of the environment or restrictions relating to function and use of the facility (Figure 1).

In den letzten Jahrzehnten wurden verschiedene Methoden zur Prognose von Karstgefährdungen für den Untertagebau entwickelt. Diesen Methoden ist gemein, dass die prognostizierte Bandbreite von Wasserzutritten für die planerische Umsetzung des Bauwerks häufig ungenügend ist. Das liegt unter anderem an den oft lückenhaften Kenntnissen über das in einem Projektgebiet vorkommende Karströhrensystem resp. der unzureichenden Vorhersagbarkeit der Lage von Karsthohlräumen und ihren Eigenschaften. Die vorgestellte Methode erlaubt eine robuste Prognose von Karstwasserzutritten. Die Methode basiert auf einer Kombination aus stochastisch generierten, pseudo-genetischen Karströhrensystemen und einer hydraulischen Modellierung der hydrogeologischen Bedingungen unter Verwendung eines Monte-Carlo Ansatzes. Der Ansatz erlaubt eine plausible Abschätzung der zu erwartenden Bandbreite karstbedingter Wassereintritte und ermöglicht darüber hinaus, die Ereigniswahrscheinlichkeit des Anfahrens eines Karsthohlraums zu bestimmen. Die Prognosen ermöglichen einen differenzierten Umgang mit der Karstwassergefährdung während Bau- und Betriebsphase eines Untertagebauwerks. Konkret betrifft dies die Planung und Durchführung von Erkundungsmaßnahmen, Maßnahmen zur Baugrundverbesserung sowie die Planung der Wasserhaltung und des Monitorings während der Bau- und Betriebsphase.

Stichworte Tunnelbau; verkarstetes Gebirge; Karstwasserzutritte; Karstwassereintritte; Prognose; Bau- und Betriebsphase

1 Einleitung

Aus geotechnischer Sicht weisen Karbonatgesteine im Allgemeinen gute bis ausgezeichnete Bedingungen für den Untertagebau auf. Sind die Karbonatgesteine allerdings verkarstet, geht dies häufig mit Gefährdungen einher, die in anderen Gebirgstypen nicht oder nur in geringerem Ausmaß auftreten, z. B. [1–3]. So besteht beim Anfahren eines Karsthohlraums die Gefahr von bedeutenden Wasserzutritten bis hin zu massiven Wassereintritten mit Schüttungen von einigen Kubikmetern pro Sekunde mit einer Sedimentfracht, die so bedeutend sein kann, dass der Tunnel murgangartig geflutet wird, z. B. [4, 5]. Die resultierenden Gefährdungsbilder können das Bauprojekt direkt während der Bau- und Betriebsphase, z. B. Fluten des Tunnels, und die Umwelt, z. B. Trockenlegen von Quellen, betreffen. Die Gefährdungen stehen im Zusammenhang mit der Verteilung und den Eigenschaften der Karsthohlräume und den vorherrschenden hydrogeologischen Verhältnissen. Sie können zu technischen Schwierigkeiten mit entsprechenden Zusatzkosten und



Fig. 1 Cutterhead of a tunnel boring machine inside a large karst void with a discharge of several m^3/s . The drive came to a standstill for several months and discharge from the spring related to of the karst conduit network was impaired.

Bild 1 Bohrkopf einer Tunnelbohrmaschine in einem größeren Karsthohlraum mit einer Schüttung von mehreren m^3/s . Der Vortrieb stand mehrere Monate still und die Schüttung der zum Karströhrensystem gehörenden Quelle wurde beeinträchtigt.

In recent decades, various methods have been developed to predict hazards associated with karst in underground construction [6–8]. Common to all these methods is that the predicted range of water inflow and associated forecasting reliability is often insufficient for implementation purposes. This is usually due to incomplete knowledge of the karst conduit network within a project area, making it difficult to predict the geometry of the karst conduit network, the spatial variability of the karst voids characteristics and the hydraulic conditions in a karst aquifer, which vary widely over time.

When it comes to predicting karst water inflow in underground construction, it is important to bear in mind that karst voids do not occur isolated; they form part of an interconnected system of solution voids known as a karst conduit network (Figure 2). This network governs groundwater circulation within the karst aquifer, whereby the karst voids and their characteristics display highly heterogeneous spatial distribution and are not necessarily distributed across the entire thickness of the karstifiable rock unit.

One particular challenge in predicting karst-related water inflow is that the karst water depends not only on the position of the karst cavities in relation to the construction works, but also on the geometry of the entire karst conduit system [9] (see Figure 2). Thus, in addition to the characteristics of the cavities along the tunnel alignment, the variation and distribution of cavities throughout the whole karst conduit network is key to predicting water inflow. To further complicate matters, due to the large hydraulic capacities of karst conduit networks, it is not unusual for karst water levels to fluctuate by over one hundred metres in just a few hours in some karst areas [10].

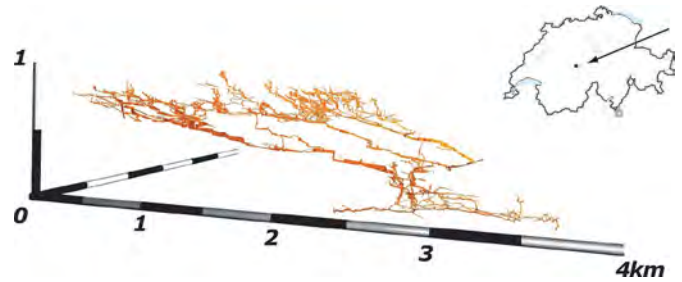


Fig. 2 Karst voids do not occur isolated within the rock mass, but form part of a system of karst conduits. As an example, a visual representation of the surveyed cave passages of the Siebenhengste-Hohgant cave system in Switzerland (around 170 km of surveyed passages; data: Höhlenforschergemeinschaft Region Hohgant HRH).

Bild 2 Karsthohlräume kommen in einem Gebirge nicht räumlich isoliert vor, sondern bilden ein System von Karströhren. Als Beispiel die visuelle Darstellung der vermessenen Höhlengänge des Siebenhengste-Hohgant-Höhlensystems in der Schweiz (rund 170 km vermessene Ganglänge; Daten: Höhlenforschergemeinschaft Region Hohgant HRH).

Bauverzögerungen, Beeinträchtigung der Arbeitssicherheit, Beeinträchtigung der Umwelt oder Funktions- und Nutzungseinschränkungen führen (Bild 1).

In den letzten Jahrzehnten wurden verschiedene Methoden zur Prognose der Karstgefährdung für den Untertagebau entwickelt [6–8]. Diesen Methoden ist gemein, dass die prognostizierte Bandbreite und damit verbundene Prognosesicherheiten von Karstwasserzutritten für die planerische Umsetzung oft ungenügend sind. Dies liegt unter anderem an den oft lückenhaften Kenntnissen über das in einem Projektgebiet vorkommende Karströhrensystem, resp. der Vorhersagbarkeit der Geometrie des Karströhrensystems, die räumliche Variabilität der Karsthohlraum-eigenschaften sowie die sich zeitlich stark verändernden hydraulischen Bedingungen in einem Karstaquifer.

In Bezug auf die Prognose von Karstwasserzutritten im Untertagebau sei in Erinnerung gerufen, dass Karsthohlräume nicht räumlich isoliert vorkommen, sondern ein System von Lösungshohlräumen darstellen, dem sogenannten Karströhrensystem (Bild 2). Dieses dominiert die Grundwasserzirkulation im Karstaquifer, wobei die Karsthohlräume sowie deren Eigenschaften räumlich sehr heterogen verteilt sind und nicht über die gesamte Mächtigkeit der verkarstungsfähigen Gesteinseinheit verteilt vorkommen müssen.

Eine Herausforderung bei der Prognose von karstbedingten Wasserzutritten stellt die Tatsache dar, dass Karstwässer nicht nur von der relativen Lage der Karsthohlräume zum Bauwerk, sondern auch von der Geometrie des gesamten Karströhrensystems abhängen [9] (vgl. Bild 2). Wesentlich für die Wasserzutrittsprognose sind nicht nur die Hohlraumeigenschaften entlang der Linienführung, sondern auch die Variation und Verteilung im ganzen Karströhrensystem. Erschwerend kommt hinzu, dass die großen hydraulischen Kapazitäten eines Karströhrensystems dazu führen, dass Karstgrundwasserspiegelschwankungen von über einhundert Metern in wenigen Stunden

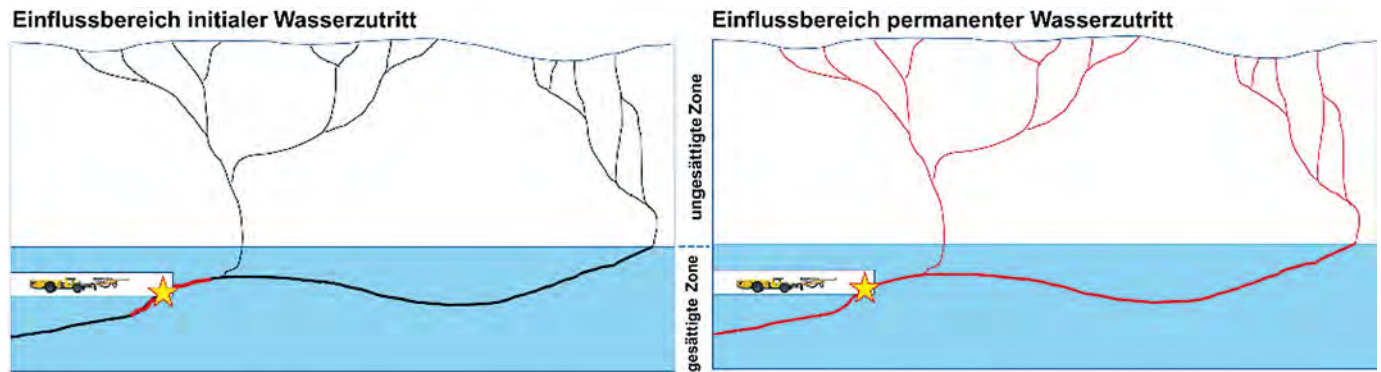


Fig. 3 While the discharge of the initial karst water inflow when a karst void is encountered while tunnel construction largely on the local characteristics of the karst void (shown in red in the left-hand image), the permanent water inflow is determined by the characteristics of the entire karst conduit network (shown in red in the right-hand image).

Bild 3 Während die initiale Schüttung beim Anfahren eines Karsthohlraums weitgehend von den lokalen Hohlraumeigenschaften abhängt (roter Bereich in der linken Abbildung), hängt der permanente Wasserzutritt von den Eigenschaften im ganzen Karströhrensystem ab (roter Bereich in der rechten Abbildung).

In the case of both karst water inflow and other types of water inflow in underground construction works, such as those caused by tectonic faults, a distinction can be made between initial and permanent water inflow. While the prediction of the initial karst water inflow is based only on the characteristics of the directly encountered karst void, the long-term behaviour of karst water inflow is determined by the hydraulic behaviour of the part of the karst conduit network that lies upstream of the place of occurrence.

The method presented in this paper uses a probabilistic approach to predict probability ranges and size of karst water inflows. The method has proven robust in preliminary practical applications and, even with moderate data availability, provides plausible predictions of karst water inflows that can help with decision-making. The method can be used as a hydrogeological extension of the established Karst-ALEA method [6], since it takes into account the same speleogenetic principles, e.g. the concept of inception features [11], or as a stand-alone prediction method.

2 Methodology

The rapid development of computer technology has substantially changed the work and the importance of numerical simulations in construction practice. Nowadays it is possible to use probabilistic approaches to close information and knowledge gaps relating either to parameterisation or understanding the circumstances. The available systems make it possible to analyse, simulate or test the plausibility of complex situations within a matter of seconds.

The method presented here is based on the stochastic generation of realistic karst conduit networks and the modelling of water inflow when these karst voids are encountered while tunnel construction. It uses a combination of stochastically generated karst conduit networks and hydraulic modelling of the hydrogeological condi-

in vielen Karstgebieten keine Besonderheiten darstellen [10].

Bei Karstwasserzutritten sowie auch bei anderen Arten von Wasserzutritten in Untertagebauwerken, z. B. aus tektonischen Störungen, kann zwischen initialem und permanentem Wasserzutritt unterschieden werden. Während für den initialen Karstwasserzutritt die Prognose nur von den Eigenschaften des unmittelbar angefahrenen Hohlraums abhängig ist, wird das Langzeitverhalten von Karstwasserzutritten vom hydraulischen Verhalten des vom Ereignisort anströmigen Teils des Karströhrensystems bestimmt (Bild 3).

Die vorgestellte Methode prognostiziert Bandbreiten von Ereigniswahrscheinlichkeit und Größe von Karstwasserzutritten durch die Verwendung eines probabilistischen Ansatzes. Die Methode hat sich in bei ersten Praxisanwendungen als robust erwiesen und erlaubt es auch bei mäßiger Datenlage, plausible und für die Entscheidungsfindung hilfreiche Prognosen der Karstwasserzutritte abzuleiten. Die Methode kann als hydrogeologische Erweiterung der etablierten KarstALEA-Methode [6], da sie die gleichen speleogenetischen Prinzipien, z. B. das Konzept der Initialfugen [11], berücksichtigen, oder als eigenständige Prognose-Methode eingesetzt werden.

2 Methodik

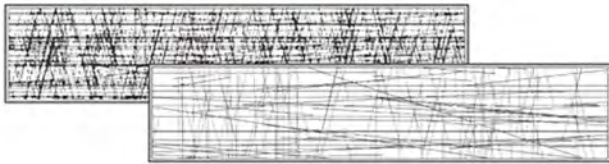
Die rasante Entwicklung der Computertechnik hat das Arbeiten und die Bedeutung von numerischen Simulationen für die Baupraxis substantiell verändert. So ist es heute möglich, Informations- oder Kenntnislücken, sei es in der Parametrisierung oder im Verständnis eines Sachverhalts, mithilfe von probabilistischen Ansätzen zu schließen. Die verfügbaren Systeme erlauben es binnen weniger Sekunden komplexe Sachverhalte zu analysieren, simulieren und auf ihre Plausibilität zu prüfen.

Das Kernstück der vorgestellten Methode ist das stochastische Generieren von realistischen Karströhrensystemen

Schritt 1: geologisches Modell



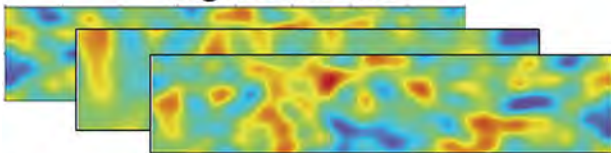
Schritt 2: Trennflächen-Modell



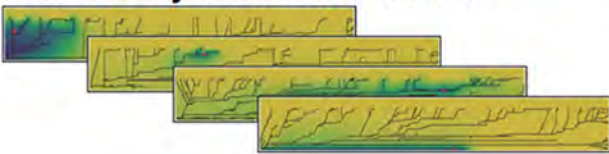
Schritt 3: Karströhren-Modell



Schritt 4: Modell der hydraulischen Eigenschaften



Schritt 5: hydraulisches Modell



Schritt 6: Ereignisse entlang Tunnelachse

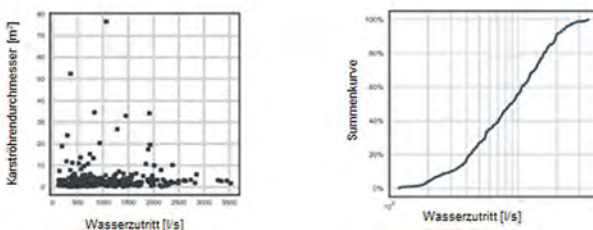


Fig. 4 The stochastic approach to estimating karst water inflows during tunnel construction in six stages. Although the models are in 3D, only vertical 2D sections are used to illustrate the methodology.

Bild 4 Der stochastische Ansatz zur Abschätzung von Karstwasserzutritten während des Tunnelbaus in sechs Arbeitsschritten. Bei den Modellen handelt es sich um 3D-Modelle; zur grafischen Veranschaulichung der Methodik werden vertikale 2D-Schnitte.

tions based on the Monte Carlo approach. The method used to estimate karst water inflow involves the six steps illustrated in Figure 4. For a detailed description of the method and the mathematical formulae used, please refer to the corresponding article [12].

und die Modellierung der Wasserzutritte beim Anfahren dieser Hohlräume. Dafür wird eine Kombination aus einem stochastisch generierten Karströhrensystem, der hydraulischen Modellierung der hydrogeologischen Verhältnisse und der Verwendung des Monte-Carlo Ansatzes genutzt. Die Methode zur Abschätzung der Karstwasserzutritte erfolgt anhand der in Bild 4 dargestellten sechs Schritte. Für eine ausführliche Beschreibung der Methode und den verwendeten mathematischen Formeln sei auf den entsprechenden Fachartikel von [12] verwiesen.

In Schritt 1 wird ein dreidimensionales geologisches Modell des Projektperimeters erstellt, in dem die Geometrie der verkarstungsfähigen Gesteinseinheiten, die Lage des Vorfluters und des Einzugsgebiets zu definieren sind. Dieser Perimeter umfasst nicht nur das eigentliche Projektgebiet, sondern umschließt das gesamte Karstgebiet, in dem sich das Projektgebiet befindet. Dies, weil einerseits die Geometrie des in Schritt 3 generierten Karströhren-Modells von der Lage des Einzugsgebiets als auch des Vorfluters abhängt, andererseits weil für die Beurteilung des permanenten Wasserzutritts das ganze Karströhrensystem betrachtet werden muss (vgl. Schritt 6).

Für dieses geologische Modell wird in Schritt 2 ein diskretes Trennflächenmodell generiert. Dieses Trennflächenmodell besteht aus Trennflächen, die bevorzugt verkarsten, sogenannten Initialfugen [12, 13]. Das Modell besteht einerseits aus bekannten, kartierten Initialfugen, z. B. regionalen Störungen, sowie aus generierten Trennflächen. Die letzteren basieren auf der statistischen Verteilung der Orientierungen, Längen und Häufigkeiten der Trennflächenscharen im Projektgebiet, die Einfluss auf die Geometrie des Karstsystems haben können. Da es sehr unwahrscheinlich ist, dass das so generierte Trennflächenmodell die realen Gegebenheiten in einem Projektgebiet darstellt, wird eine Vielzahl von Trennflächenmodellen generiert. Es wird angenommen, dass die realen Gegebenheiten innerhalb der Bandbreite der so generierten Trennflächenmodelle liegen.

Schritt 3 besteht im Generieren der Geometrie des Karströhrensystems mittels eines pseudo-genetischen Ansatzes [14, 15]. Der Ansatz ahmt durch eine "fast marching"-Technik in vereinfachter Weise die Prozesse der Speläogenese nach. Wasser infiltriert an bekannten und/oder statistisch generierten Infiltrationsstellen (Ponore) in die verkarstungsfähige Gesteinseinheit. Von diesen Stellen wird die Entwicklung des Karströhrensystems auf hierarchische Weise simuliert, wobei auch mehrere Verkarstungsphasen berücksichtigt werden können. Eine Reihe von Parametern erlaubt es, die Karströhrendichte, seine hierarchische Struktur oder die geometrische Bedeutung des Trennflächenmodells zu beeinflussen [6, 14]. Da es sehr unwahrscheinlich ist, dass das so generierte Karströhrensystem die realen Gegebenheiten darstellt, wird pro Trennflächenmodell eine Vielzahl von möglichen Karströhrensystemen generiert. Das geschieht ebenfalls in der Annahme, dass sich die realen Gegebenheiten in-

In Step 1, a three-dimensional geological model of the project perimeter is created which defines the geometry of the karstifiable rock units and the location of the spring and catchment area. This perimeter encompasses not just the actual project area, but the entire karst system in which the project area is located. There are two reasons for this: firstly, the geometry of the cast conduit model generated in Step 3 is determined by the location of the catchment and spring area, and secondly, the entire karst conduit network must be included in order to assess the permanent water inflow (see Step 6).

A discrete discontinuity model is built in Step 2 and added to the geological model of Step 1. This discontinuity model comprises discontinuities which are susceptible to karstification processes, referred to as inception features [12, 13]. The model consists of known, mapped inception features, e.g. regional faults, and generated discontinuities. The latter are based on the statistical distribution of the orientation, length and frequency of sets of discontinuities within the project area which can influence the geometry of the karst system. Since the discontinuity model generated in this way is very unlikely to represent the actual situation within a project area, multiple discontinuity models are generated. It is assumed that the actual situation will be included within the range of this large number of discontinuity models.

Step 3 consists of generating the geometry of the karst conduit network using a pseudo-genetic approach [14, 15]. This approach uses fast-marching methods to simulate speleogenetic processes in a simplified way. Water infiltrates the karstifiable rock unit at known and/or statistically generated infiltration points (ponors). From these points, the development of the karst conduit network is simulated hierarchically, which allows several karstification phases to be considered. Using a range of parameters, it is possible to influence the karst conduit density, its hierarchical structure or the geometric relevance of the discontinuity model [6, 14]. Since it is very unlikely that the karst conduit network generated in this way represents the actual features, multiple possible karst conduit networks are generated for each discontinuity model. Here too, it is assumed that the actual features will be reproduced within the range of generated karst conduit networks.

Step 4 assigns hydrological characteristics to the generated karst conduit networks as well as to the discontinuity models and the rock matrix. This is done by generating random fields of the hydraulic characteristics and assigning them to the models [12]. Again, multiple random fields are generated and assigned for each karst conduit network.

In Step 5 the hydrogeological framework conditions are applied to each model and the flow equations for the rock matrix, discontinuities and karst conduits are solved [16]. The result is a complete distribution of the hydraulic pressure levels and ground water flow in the models.

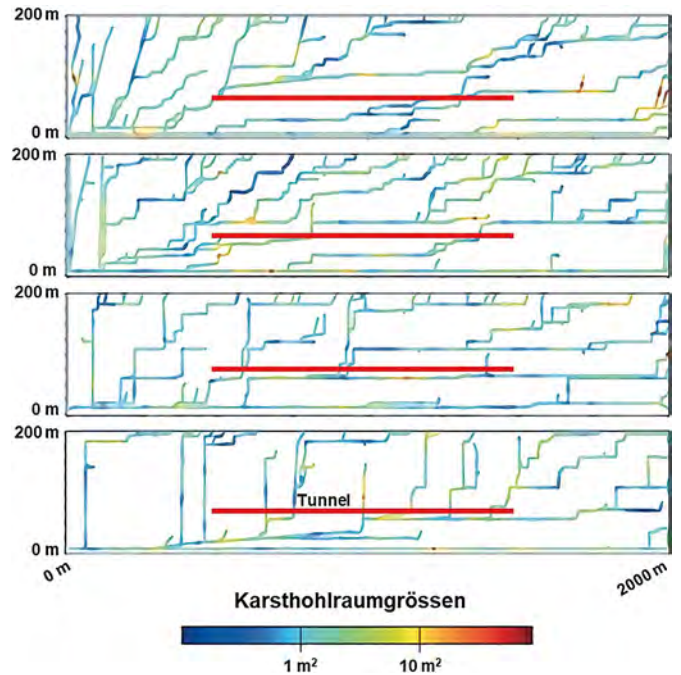


Fig. 5 Four selected karst conduit networks among several generated network models with the distribution of the karst void size in color (2D projection along the tunnel alignment, although the karst conduit network extends in 3D). Although it is highly unlikely that the generated karst conduit networks portray the actual conditions, it can be assumed that the actual conditions will be present within the multitude of scenarios generated.

Bild 5 Vier von einer Vielzahl ausgewählter generierten Karströhrensystemen und deren Hohlraumgrößen im Bezug zum Tunnel (2D-Projektion entlang der Tunnelachse, das Karströhrensystem erstreckt sich jedoch in 3D). Es ist sehr unwahrscheinlich, dass die generierten Karströhrensysteme die realen Verhältnisse abbilden. Dennoch kann angenommen werden, dass in der Vielzahl von generierten Modellen, die realen Verhältnisse enthalten sind.

nerhalb der Bandbreite der generierten Karströhrensysteme abbilden.

Schritt 4 ordnet den generierten Karströhrensystemen sowie den Trennflächenmodellen und der Matrix der Gesteinseinheiten die hydraulischen Eigenschaften zu. Dafür werden Zufallsfelder der hydraulischen Eigenschaften generiert und den Modellen zugewiesen [12]. Wieder werden pro Karströhrensystem eine Vielzahl von Zufallsfeldern generiert und zugewiesen.

In Schritt 5 werden für jedes Modell die hydrogeologischen Rahmenbedingungen angewendet und die Strömungsgleichungen für die Gesteinmatrix, für die Trennflächen und für die Karströhren gelöst [16]. Das Ergebnis ist eine vollständige Verteilung der hydraulischen Druckhöhen und Grundwassergeschwindigkeiten in den Modellen.

Schritt 6 stellt die bauwerksbezogene Anwendung dar. In die Modelle werden vordefinierte oder zufällig platzierte Linienführungen von Tunneln projiziert (Bild 5). Zur Auswertung wird pro Modell, die Anzahl von angefahrenen Karsthohlräumen, die Größe der Ereignisse (Hohlraumgrößen, Bergwasseranfall) und die Dynamik (initialer vs. permanenter Wasserzutritt) bestimmt.

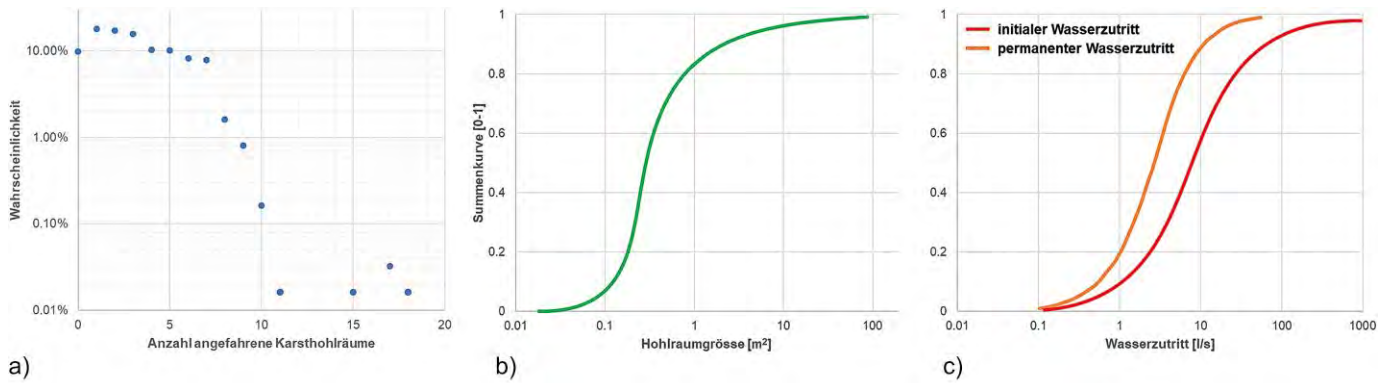


Fig. 6 Example of the analysis a) Probability of encountering a certain number of karst voids when excavating a tunnel; b) Probability of the encountered karst voids having a certain size; c) Probability of the karst water inflow in an encountered karst void having a certain discharge.

Bild 6 Beispielauswertung: a) Wahrscheinlichkeit beim Auffahren eines Tunnels eine gewisse Anzahl von Karsthohlräume anzufahren; b) Wahrscheinlichkeit, dass ein angefahrener Karsthohlraum eine gewissen Hohlraumgröße hat; c) Wahrscheinlichkeit, dass der Karstwasserzutritt eines angefahrenen Karsthohlraums eine gewisse Schüttung hat.

Step 6 relates the findings to the construction project. Predefined or randomly placed tunnel alignments are projected into the models (Figure 5). The number of karst voids encountered, the size of the incident (karst void sizes, amount of water) and the dynamics (initial vs. permanent water inflow) are determined for each model for evaluation.

The karst systems created in this way and their points of intersection with the tunnel represent a plausible configuration. It is very unlikely that a model will exactly reflect the actual conditions. Nonetheless, it can be assumed that the actual conditions will be present within the multitude of scenarios generated. So the events obtained per scenario are combined and statistically evaluated to deduce ranges of expected hazards for the construction project. These represent a robust data basis for differentiated treatment of the hazards associated with karst water and facilitate date-driven decision-making, e.g. for planning and implementing exploratory measures or designing the dewatering system and monitoring it during the construction and operation phase.

3 Sample application

The probabilistic prediction of karst water inflows facilitates estimation of the probability of occurrence and size of karst water inflows and intrushes during the construction of an underground structure. To illustrate how this method can be used, some key findings from a karst water inflow prediction for a 1000 m long tunnel through karstified rock mass are presented below (Figure 6). The results are plotted as summation curves combining the results of 100,000 simulations. The graphs show the probability that

- a certain number of karst voids will be encountered during tunnel excavation e.g. around 10% probability of encountering five karst voids during excavation (Figure 6a)

Die so erstellten Karstsysteme und Verschnitte mit dem Tunnel stellen jeweils eine plausible Konfiguration dar. Es ist sehr unwahrscheinlich, dass ein Modell die realen Verhältnisse exakt wiedergibt. Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass in der Vielzahl der generierten Szenarien, die realen Verhältnisse enthalten sind. So werden die pro Szene erhaltenen Ereignisse kombiniert und statistisch ausgewertet, um Bandbreiten der zu erwartenden Gefährdungen für das Bauvorhaben abzuleiten. Diese stellen eine robuste Datengrundlage für einen differenzierten Umgang mit der Karstwassergefährdung während Bau- und Betriebsphase dar und erlaubt eine datenbasierte Entscheidungsfindung, z. B. für die Planung und Durchführung von Erkundungsmaßnahmen oder der Planung der Wasserhaltung und des Monitorings während der Bau- und Betriebsphase.

3 Anwendungsbeispiel

Die probabilistische Prognose von Karstwasserzutritten ermöglicht es, die Ereigniswahrscheinlichkeit und Größe von Karstwasserzutritten resp. Karstwassereinbrüchen während des Baus eines Untertagebauwerks abzuschätzen. Zur Veranschaulichung der Anwendbarkeit der Methode sind im Folgenden einige Schlüsselresultate einer Karstwasserzutritts-Prognose für einen 1.000 m langen Tunnel durch ein verkarstetes Gebirge vorgestellt (Bild 6). Die Ergebnisse sind grafisch als Summenkurven dargestellt und vereinen die Resultate von 100.000 Simulationen. Die Diagramme zeigen unter anderem, wie wahrscheinlich es ist,

- Dass während des Vortriebs eine gewisse Anzahl von Karsthohlräumen angefahren wird, z.B. rund 10% Wahrscheinlichkeit, dass während des Vortriebs fünf Karsthohlräume angefahren werden (Bild 6a),
- Dass die Hohlräume eine gewisse Größe haben, z. B. rund 80% Wahrscheinlichkeit, dass die angefahrenen Karsthohlräume eine Querschnittsfläche kleiner 1 m² haben (Bild 6b),

- the karst voids will have a certain size, e.g. around 80% probability of the karst voids encountered having a cross-section smaller than 1 m² (Figure 6b)
- the water inflow will have a certain initial or permanent discharge, e.g. around 60% probability of having an initial discharge smaller than 10 l/s (Figure 6c).

The number, size and flow of events actually encountered during the tunnel excavation lay within the predicted range. The results enabled a differentiated treatment of the hazards associated with karst water inflow during the construction and operation phase and had a direct influence on the exploration programme and the measures undertaken ahead of the tunnel face to consolidate the rock.

4 Conclusion

A probabilistic approach is used to improve the prediction of karst water inflow in underground construction and to enable the differentiated treatment of the hazards associated with karst water during the construction and operation phase of an underground structure. This makes it possible to close information and knowledge gaps relating to the geometry and hydraulic characteristics of the karst conduit network. Although the karst conduit networks modelled with this approach and the derived points of intersection with the underground structure cannot represent the actual conditions in the project area, they nonetheless lie within the range of the automatically generated scenarios. Analysis of the scenarios enables not only the range of expected karst water inflows to be depicted, but also the probability of events occurring during the construction phase to be estimated. The approach has proven robust in preliminary practical applications and, even with moderate data availability, enables plausible predictions of karst water inflows to be derived that can help with decision-making. The method can be used as a hydrogeological extension of the established Karst-ALEA method [6] or as a stand-alone prediction method.

References

- [1] Marinou, P. G. (2001) *Tunnelling and mining in karstic terrain: An engineering challenge* in: Beck & Herring (eds): *Geotechnical and Environmental Applications of Karst Geology and Hydrology*. Pp. 3–16. AA. Balkema:
- [2] Milanović P. (2000) *Geological engineering in karst. Dams, reservoirs, grouting, groundwater protection, water tapping, tunneling*. Belgrade. Zebra Publ.
- [3] Höfer-Öllinger, G. (2016) *Tunnelbau und Karst* In: Spötl, Plan & Christian (eds): *Höhlen und Karst in Österreich*. S. 113–122. Oberösterreichisches Landesmuseum
- [4] Häuselmann, P.; Jeannin, P.-Y. (2009) *Wasserwege der Gemeinde Flims und ihre Einflüsse auf den Caumasee – Öffentlicher Bericht 2004–2008*. Schweizerisches Institut für Speläologie und Karstforschung, <https://www.gra-nat.ch/system/media/3220/original/Karstsystem-Flims.pdf>
- [5] Li, L.; Tu, W.; Shi, S.; Chen, J.; Zhang, Y. (2016) *Mechanism of water inrush in tunnel construction in karst area in*

- Dass der Wasserzutritt eine gewisse initiale oder permanente Schüttung hat, z. B. rund 60% Wahrscheinlichkeit, dass die initiale Schüttung der angefahrenen Karsthohlräume kleiner 10 l/s ist (Bild 6c).

Die Anzahl, Größe und Wasserführung der während des Vortriebs tatsächlich angetroffenen Ereignisse lag in der prognostizierten Bandbreite der Prognose. Die Resultate ermöglichten einen differenzierten Umgang mit der Karstwassergefährdung während Bau- und Betriebsphase und hatten einen direkten Einfluss auf das Erkundungsprogramm und die dem Bau vorausseilende Maßnahmen zur Ertüchtigung des Gebirges.

4 Zusammenfassung

Zur Verbesserung der Prognosen zu Karstwasserzutritten im Untertagebau resp. für einen differenzierten Umgang mit der Karstwassergefährdung während Bau- und Betriebsphase eines Untertagebauwerks wird ein probabilistischer Ansatz verwendet. Dieser erlaubt es, Verständnis- und Informationslücken in Bezug zur Geometrie und hydraulischen Eigenschaften des Karströhrensystems zu schließen. Die mit diesem Ansatz modellierten Karströhrensysteme sowie abgeleitete Verschnitte mit dem Untertagebauwerk können die realen Verhältnisse in einem Projektgebiet nicht darstellen, diese sind jedoch in der Bandbreite der automatisch generierten Szenarien enthalten. Die Auswertung der Szenarien erlaubt es nicht nur, die Bandbreite der zu erwarteten Karstwasserzutritte darzustellen, sondern auch die Wahrscheinlichkeit der Ereignisse während der Bauphase abzuschätzen. Dieser Ansatz erwies sich in den ersten Praxisanwendung als robust und erlaubt es auch bei mäßiger Datenlage, plausible und für die Entscheidungsfindung hilfreiche Prognosen für Karstwasserzutritte abzuleiten. Die Methode kann als hydrogeologische Erweiterung der KarstALEA-Methode [6] oder als eigenständige Prognose-Methode eingesetzt werden.

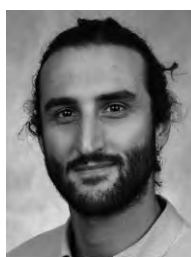
- [6] Filipponi, M.; Schmassmann, S.; Jeannin, P. Y.; Parriaux, A. (2012) *KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagebau*. Forschungsprojekt FGU 2009/003 des Bundesamt für Strassen ASTRA, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, Zürich.
- [7] Li, S. C.; Wu, J. (2019) *A Multi-Factor Comprehensive Risk Assessment Method of Karst Tunnels and Its Engineering Application* in *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 78, pp. 1761–1776.
- [8] Pinillos Lorenzana, L. M. (2015) *Túneles en macizos calcáreos karstificados: impacto en las obras subterráneas de los fenómenos kársticos, su evaluación y tratamiento*. Universidad Politécnica de Madrid.

- [9] Jeannin, P. Y.; Malard, A.; Rickerl, D.; Weber E. (2015) *Assessing karst-hydraulic hazards in tunneling – the Brunnmühle spring system – Bernese Jura, Switzerland* in *Environmental Earth Sciences* 74, pp. 7655–7670.
- [10] Wildberger, A.; Jeannin P. Y.; Pulfer, T. (2001) *Hochwasser 1999 und 2000 im Hölloch – Beobachtung und Folgerungen* in *Actes du 11 Congrès National de Spéléologie*, pp. 81–88.
- [11] Lowe, D. J. (2000) *Role of stratigraphic elements in speleogenesis: the speleo inception concept* in: Klimchouk, Ford, Palmer & Dreybrodt (eds): *Speleogenesis, evolution of karst aquifers*. pp. 65–76. National Speleological Society.
- [12] Dall'Alba, V.; Neven, A.; de Rooijb, R.; Filipponi M.; Renard, P. (2022) *Probabilistic estimation of tunnel inflow from a karst conduit network* submitted to *Engineering Geology*, in review.
- [13] Faulkner, T. (2006) *Tectonic inception in caledonide Marbles* in *Acta Carsologica* 35, no. 1, pp. 7–21.
- [14] Borghi, A., Renard, P., Jenni, S. (2012) A pseudo-genetic stochastic model to generate karstic networks. *Journal of Hydrology* 414–415, S. 516–529. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.032>
- [15] Fandel, C.; Miville, F.; Ferré, T.; Goldscheider, N.; Renard, P. (2022) *The stochastic simulation of karst conduit network structure using anisotropic fast marching, and its application to a geologically complex alpine karst system* in *Hydrogeology Journal* 30, pp. 927–946. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02464-x>
- [16] de Rooij, R. (2019) *Improving accuracy and efficiency in discrete-continuum karst models* in *Environ Earth Science* 78. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8115-5>

Autoren



Marco Filipponi (corresponding author)
marco.filipponi@nagra.ch
NAGRA Ringgold standard institution
Hardstrasse 73
5430 Wettingen
Switzerland



Valentin Dall'Alba,
valentin.dallalba-arnau@unine.ch
University of Neuchâtel
Centre of Hydrogeology and Geothermics
Rue Emile-Argand 11,
2000 Neuchâtel
Switzerland



Philippe Renard
philippe.renard@unine.ch
University of Neuchâtel
Centre of Hydrogeology and Geothermics
Rue Emile-Argand 11,
2000 Neuchâtel
Switzerland



Alexis Neven
alexis.neven@unine.ch
University of Neuchâtel
Centre of Hydrogeology and Geothermics
Rue Emile-Argand 11,
2000 Neuchâtel
Switzerland

How to Cite this Paper

Filipponi, M.; Renard, P.; Dall'Alba, V.; Neven, A. (2022) *Probabilistic prediction of karst water inflow during construction of underground structures*. *Geomechanics and Tunneling* 15, No. 5, pp. 642–649. <https://doi.org/10.1002/geot.202200029>

This paper has been peer reviewed. Submitted: 14. June 2022; accepted: 18. August 2022.

Zitieren Sie diesen Beitrag

Filipponi, M.; Renard, P.; Dall'Alba, V.; Neven, A. (2022) *Probabilistische Prognose von Karstwasserzutritten beim Bau von Untertagebauwerken*. *Geomechanik und Tunnelbau* 15, H. 5, S. 642–649. <https://doi.org/10.1002/geot.202200029>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet. Eingereicht: 14. Juni 2022; angenommen: 18. August 2022.