

# Baugrundrisiken in schwierigem Untergrund mit geophysikalischen Methoden erkennen und entschärfen – am Beispiel des Neubaus der ARA Furnatsch in S-chanf, GR

Edi Meier <sup>1</sup>, Inma Gutiérrez <sup>1</sup>, Thomas Rüegg <sup>2</sup>, Markus Berweger <sup>3</sup>

**Keywords:** Baugrund, Georadar, Gipskarst, Raibler Schichten

## Abstract

During the excavation work for the ARA Furnatsch in S-chanf GR in summer 2017, a large open karst cave was found in the rock of the excavation pit consisting of gypsum-containing *Raibler-Rauhacke*. It was to be expected that there would be further, invisible cavities under the excavation pit floor. Such cavities could pose a serious subsoil risk for the building structure.

In order to test the bearing safety of the subsoil, it was measured area-wide by means of georadar. The investigation showed clear indications of several further cavities. Subsequently, an excavator was used to examine the identified areas. In fact, further karst cavities with expansions up to several tens of meters were uncovered. These were partly open, partly filled with fine-grained weathering products of the *Rauhacke*. Before the floor slab was constructed, loose material was removed from the cavities and then filled with boulders, gravel and concrete.

## Zusammenfassung

Bei den Aushubarbeiten für die ARA Furnatsch in S-chanf GR im Sommer 2017 wurde in der Baugrubensohle eine grosse offene Karsthöhle im Felsuntergrund aus gipshaltiger *Raibler-Rauhacke* vorgefunden. Es war zu erwarten, dass unter der Baugrubensohle weitere, nicht sichtbare Hohlräume vorhanden sind. Solche konnten für das Bauwerk ein gravierendes Baugrundrisiko darstellen.

Um die Tragsicherheit des Untergrundes zu prüfen, wurde dieser mittels Georadar flächendeckend vermessen. Die Untersuchung zeigte deutliche Hinweise auf mehrere weitere Hohlräume. In der Folge

wurde an den erkannten Stellen mit einem schweren Bagger nachgegraben. Tatsächlich wurden dabei weitere Karsthohlräume mit Ausdehnungen bis in den Bereich von mehreren Zehnermetern freigelegt. Diese waren teilweise offen, teilweise ausfüllt mit weichen, feinkörnigen Verwitterungsprodukten der *Rauhacke*. Vor der Erstellung der Bodenplatte wurde loses Material aus den Hohlräumen entfernt und diese anschliessend mit Felsblöcken, Kiessand und Beton verfüllt.

## 1 Ausgangslage

Der Abwasserverband Oberengadin (ARO) erstellt auf dem Areal der bisherigen ARA Furnatsch in S-chanf eine neue Kläranlage für die Region Oberengadin. Diese ersetzt gleichzeitig auch die Anlagen Staz in Celerina und Sax in Samedan. Das Bauobjekt liegt nord-östlich von S-chanf zwischen der Engadinerstrasse H27 und dem Inn, angrenzend an den Flabschiessplatz S-chanf. Der an dieser Stelle im Fels liegende Inn umfließt das Bauwerk in einer markanten S-Kurve.

Das viergeschossige, vollständig abgeschlossene Bauwerk umfasst eine Grundfläche von rund 8400 m<sup>2</sup> und eine Bauhöhe von 19.50 m. Seine Erstellung erforderte einen im Lockergestein liegenden senkrechten Hanganschnitt von rund 100 m Länge und bis zu 10 m Höhe sowie eine teilweise Tiefenfundation.

<sup>1</sup> Edi Meier + Partner AG, Schützenstrasse 1, 8400 Winterthur, info@emp-winterthur.ch

<sup>2</sup> Rüegg Ingenieurgeologie / Hydrologie, Dorfstrasse 20, 7402 Bonaduz, th.ruegg@bluewin.ch

<sup>3</sup> AF Toscano AG, Via Ruinatnatsch 18, 7500 St. Moritz, markus.berweger@toscano.ch

In den Jahren 2014-2016 wurde der Baugrund parallel zur Entwicklung des Bauprojekts in mehreren Etappen untersucht. Insgesamt wurden 11 Kernbohrungen und mehrere Baggerschlitzte ausgeführt. Gestützt auf die Resultate lag der grundbauliche Fokus bei den primären Baugrundrisiken, namentlich bei

den Konzepten für die Sicherung der Baugrube und für die Gebäudefundation im vorliegenden inhomogenen Baugrund.

Als weiteres Baugrundrisiko wurde auch das Auftreten von Gipskarst erkannt, jedoch als wenig wahrscheinlich eingestuft [2]. Die Erkenntnisse aus der Bauausführung zeigten jedoch, dass dieses Risiko unterschätzt wurde.

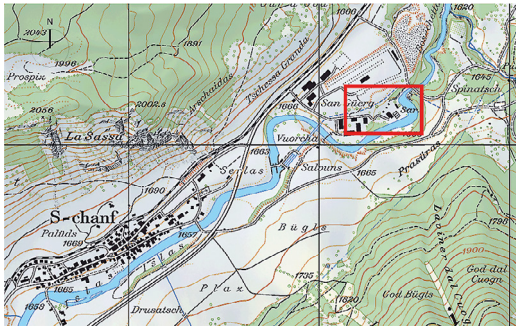


Fig. 1: Kartenausschnitt mit Lage des Bauwerks nordöstlich von S-chanf (oben) und Luftbild mit der bestehenden und der gelb eingezeichneten neuen Kläranlage (unten, © Swisstopo).

## 2 Geologische Verhältnisse am Baustandort

### 2.1 Baugrund

Die westlichen zwei Drittel des Bauwerks liegen im Fels. Dieser wird aus Gesteinen der Raibler Schichten der oberen Trias aufgebaut, grösstenteils aus Rauhwanke und untergeordnet aus Tonschiefern. Im östlichen Drittel des Bauareals ist der Felsuntergrund von geringmächtigen Moränenschichten, Bachablagerungen und künstlichen Auffüllungen von unterschiedlicher Zusammensetzung, Lagerungsdichte und Mächtigkeiten überdeckt.

Die Rauhwanke besteht lithologisch aus einer inhomogenen Wechsellagerung von Dolomiten, grobporösen Kalken und Gips. Letzterer tritt im unverwitterten Zustand

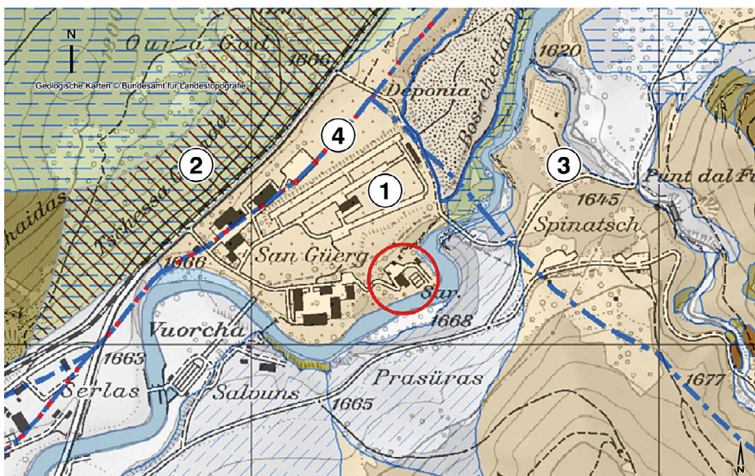


Fig. 2: Geologische Karte des Baustandortes (roter Kreis): 1 = Errdecke, 2 = Silvrettadecke, 3 = Ortlerdecke, 4 = Engadiner Linie (Grundlage: Geocover 1:25'000, © Swisstopo).

des Gesteins sowohl in feiner („zelliger“) Verteilung innerhalb der karbonatischen Schichten als auch in grösseren Konkretionen auf. Durch chemische Verwitterung wird der gut wasserlösliche Gips mit dem Grundwasser sukzessive abtransportiert. Es verbleibt das charakteristische löcherige Kalkgerüst im Makrobereich, lokal bilden sich auch grössere Hohlräume.

Tektonisch befindet sich der Baustandort an einem Hotspot der alpinen Geologie, denn in unmittelbarer Nähe stossen drei Decken aneinander: Die Errdecke, in deren Sedimentgesteinen das Bauareal liegt, begrenzt durch die Silvrettadecke im Nordwesten und Ortlerdecke im Nordosten. Überdies hinaus verläuft die Engadiner Linie – eine der grössten tektonischen Bruchzonen der Alpen – nur wenige hundert Meter nordwestlich des Bauareals durch den Talboden.

Entsprechend ihrer Lage im Spannungsfeld der alpinen Gebirgsbildung sind die Gesteine des lokalen Felsuntergrundes stark spröde deformiert. Der Deformationsgrad ist in Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften der Gesteine sehr uneinheitlich; er reicht von einer erhöhten Klüftigkeit und Auflösung des Felskörpers in einzelne Schollen bis zu einer vollständigen Entfestigung (Kakiritisierung) des Gesteinsverbandes. Teilweise weist der Fels Eigenschaften eines dicht gelagerten Lockergesteins auf.

## 2.2 Grundwasser

### Lockergestein

Die kiesigen Bachablagerungen über dem Felsuntergrund sind durch das tiefe Vorflutniveau des Inns bis unter die Bauwerkssohle drainiert. Einzig im Bereich der nördlichen Gebäudeecke wurde an der Basis der Kieschichten etwas Grundwasser von wenigen Dezimetern Mächtigkeit über der stauenden Moräne vorgefunden.

### Fels

Sowohl aus den Sondierbohrungen während der Planungsphase wie aus den Feststellungen während der Bauphase geht die Erkenntnis hervor, dass sich die Grundwasserzirkulation im verkarsteten Fels auf einzelne Wasserwege beschränkt – dort zum Teil allerdings mit hohem Durchsatz. Das Grundwasser liegt aber in jedem Fall mehrere Meter unter der Bodenplatte.

## 3 Baugrundrisiko Gipskarst

### 3.1 Karsterscheinungen in regionaler Umgebung

Erscheinungen von Gipskarst sind in den gipshaltigen Gesteinen der Raiblerguppe zwischen St. Moritz und Brail häufig vorzufinden. Sie manifestieren sich durch zahlreiche Dolinen in den Talhängen beidseits des Haupttales. Meist liegen diese jedoch ausserhalb der Siedlungsgebiete im Hochgebirge und sind daher bautechnisch nicht relevant.

Ein Beleg dafür, dass die Rauhwackenzüge lokal auch unter den Lockergesteinsfüllungen des Talbodens auftreten und eine Gefährdung für Menschen und Anlagen darstellen können, zeigte im April 2010 ein Ereignis im Talboden zwischen Zuoz und S-chanf. Über Nacht ereignete sich im Gebiet *Champagnas* wenig unterhalb der alten Kantonsstrasse und unweit der Loipe des Engadin Skimarathon ein plötzlicher Geländeeinbruch von mehreren Metern Tiefe (Fig. 3). Das Ereignis ist auf das Kollabieren eines durch Gipskarst entstandenen Hohlraumes in unbekannter Tiefe zurückzuführen.





Fig. 3: Geländeeinbruch im Gebiet Champagnas, Zuoz [Bild Th. Rüegg, 16.04.2012].

### 3.2 Karsterscheinungen im Bereich des Bauwerks

#### Karsthohlräume

Ende Juli 2017 wurde in der Rauhwaacke am Fuss der hangseitigen (nordwestlichen) Baugrubenwand ein spaltenförmiger Karsthohlraum angeschnitten.

Mit dem weiteren Baufortschritt wurde festgestellt, dass es sich beim freigelegten Teil um einen Seitenast eines grösseren zusammenhängenden Systems von Hohlräumen handelte. Anfang August 2017 wurde in der Baugrubensohle eine Karsthöhle mit einem sichtbaren Rauminhalt von weit über 1000 Kubikmetern freigelegt, welche sich nur wenige Meter unterhalb der Baugrubensohle rund 10 Meter unter das zukünftige Gebäude und mindestens 20 m unter die hangseitige Baugrubenwand erstreckte (Fig. 4 und 5).

Die obersten 3 Meter dieses Hohlräume waren mit Luft, der untere Teil mit Wasser von unbekannter Tiefe gefüllt (Fig. 6). Das verbleibende wenige Meter mächtige Dach der Karsthöhle bestand aus stark verwitterter und entfestigter Rauhwaacke.

Ein Leerpumpen des Karsthohlraumes erwies sich als nicht möglich. Auch nach mehrtägigem Pumpbetrieb blieb der Wasserspiegel konstant. Am 4. August 2017 wurde aus dem Karstgrundwasser eine Probe entnommen und chemisch analysiert. Die Analytik zeigte ein sehr hartes Wasser (52.4 °fH) mit einem pH von 7.54 und einem Sulfatgehalt von 258 mg/L. Es ist damit schwach betonaggressiv (XA1).

#### Folgerungen und Massnahmen

Durch diese Feststellungen musste die Einschätzung des Baugrundrisikos Gipskarst



Fig. 4: Lage des freigelegten Karsthohlraumes an der hangseitigen Baugrubenwand [Bild Th. Rüegg, 31.07.2017].

grundlegend revidiert werden. Es musste von der Möglichkeit ausgegangen werden, dass weitere, nicht sichtbare Hohlräume in geringerer Tiefe unter den Fundamenten des Bauwerks auftreten, welche zu einem plötzlichen Versagen der Tragfähigkeit führen können.

In der Folge wurden verschiedene geophysikalische Untersuchungsmethoden zur Detektion allfälliger weiterer Karstöffnungen unterhalb der Baugrubensohle evaluiert: Seismik, Gravimetrie und Georadar. Nach eingehender Prüfung fiel die Entscheidung zugunsten des Georadars. Ausschlaggebend dafür war die mit dieser Messmethode gegebene Möglichkeit, den Untergrund mit hoher Auflösung und mit geringem Zeit- und Kostenaufwand zu scannen und auch kleinere Hohlräume zu lokalisieren. Als Nachteil dieser

Methode musste eine im vorliegenden Baugrund vergleichsweise geringe Eindringtiefe des Radars in Kauf genommen werden, was aber für die Fragestellung nicht matchentscheidend war.

## 4 Untersuchungen mit Georadar

### 4.1 Messprinzip

Das zur Untersuchung der Baugrundsohle eingesetzte Georadarverfahren erlaubt es, zerstörungsfrei die Struktur des Untergrundes in einem Tiefenbereich von wenigen Zentimetern bis – im Idealfall – ca. 30 m zu untersuchen. Mit diesem Verfahren werden Unterschiede in der Leitfähigkeit des Untergrundes als räumliches Abbild wiedergegeben.



Fig. 5: Freigelegter Zugang zum Karsthohraum (Bild Th. Rüegg, 04.08.2017).



Fig. 6: Im Inneren des Karsthohraumes (Bild Th. Rüegg, 04.08.2017).



Die Messapparatur besteht im Wesentlichen aus einer Sende- und einer Empfangsantenne und einem Feldcomputer. Über ein präzises Wegmessrad werden jeweils gleichabständige Messungen ausgelöst. Beide Antennen sind mobil und werden für die Messung über den zu untersuchenden Untergrund bewegt (Fig. 7 und 8). Von der Sendeantenne wird ein Radarimpuls in den Boden abgestrahlt. Dieser Impuls wird von im Boden vorhandenen Grenzflächen (Leitfähigkeitsunterschied zwischen Schichten) reflektiert und das Echo von der Empfangsantenne als sogenannte Spur aufgezeichnet (Fig. 7). Die Laufzeit zwischen Senden und Empfangen des Impulses wird in die entsprechende Tiefenlage des Reflektors umgerechnet.

Das Ergebnis einer solchen Messung wird als Radargramm bezeichnet und erinnert visuell an eine Art geologischen Aufschluss. Das Radargramm gibt jedoch keine Auskunft über das Material selbst. Diese Informationen müssen mit Hilfe von ergänzenden Sondierungen gewonnen werden.

Die Genauigkeit, mit der das Georadarverfahren räumliche Strukturen des Untergrundes auflösen kann, hängt von der Antennenfrequenz ab, die in der Regel zwischen 50 MHz und 1000 MHz wählbar ist. Antennen mit 1000 MHz werden fast ausschliesslich in der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen eingesetzt.

Wichtig zu wissen ist, dass ein Georadarbild immer ein Abbild der elektrischen

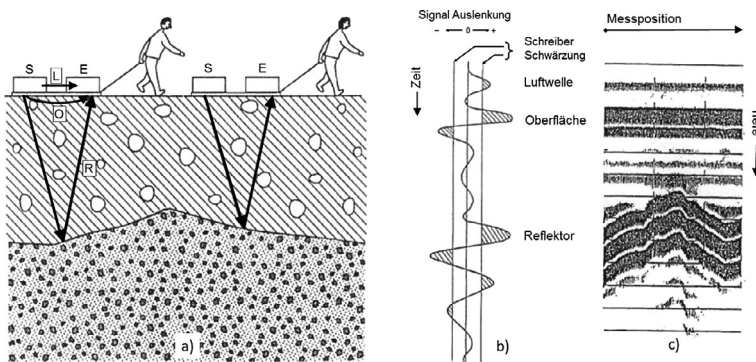


Fig. 7: Messprinzip [Bild aus Meier & Huggenberger 1992, modifiziert]: a) elektromagnetischer Puls wird vom Sender (S) ausgestrahlt. Ändert der elektrische Widerstand, wird das Signal reflektiert und vom Empfänger (E) aufgenommen. Das Radar wird zur nächsten Messposition weitergezogen; b) Empfangssignal bei der Empfangsantenne; c) Aneinanderreihung der Empfangssignale ergibt Radargramm.



Fig. 8: Das Georadar-Equipment in Aktion [Bild Th. Rügegg, 15.08.2017].

Eigenschaften des Bodens darstellt. Im Gegensatz zur Seismik geht aus den Georadarmessungen nicht hervor, ob ein weiches oder hartes Material im Untergrund vorliegt. Während bei der Seismik Dichteunterschiede zwischen zwei Schichten ein Reflexionssignal erzeugen, ist es beim Radar der Unterschied des elektrischen Widerstandes. Je grösser dieser ist, desto stärker ist das Reflexionssignal. Im Fall der Untersuchung für die ARA Furnatsch, wo nach Karsthohlräumen gesucht wurde, d.h. ein Übergang von Bodenmaterial zu Luft, mussten somit signifikante Geschwindigkeitsunterschiede vorliegen.

## 4.2 Felduntersuchungen

Die Feldsuchungen wurden ab Mitte August 2017 in Abstimmung mit dem Baufortschritt in vier Etappen zwischen August 2017 und April 2019 ausgeführt.

Total wurden 111 Parallelprofile aufgenommen; in der ersten Etappe in einem seitlichen Abstand von 50 cm, in den weiteren drei Etappen von 1.00 m. Längs der Profile wurde alle 5 cm ein Messwert gespeichert. Der Messlinienraster der ersten 48 Profile der Messkampagne vom August 2017 ist in Fig. 10 dargestellt. Die restlichen 63 Profile schliessen südlich an dieses Raster an.

## 4.3 Ergebnisse - Radargramme

Die Reflektogramme der Rohdaten werden unmittelbar nach der Messung auf dem Feldcomputer dargestellt (Fig. 9). Eine zuverlässige Aussage im Feld ist jedoch oftmals schwierig, da die Bilder von Störsignalen wie beispielsweise starken Sendern oder grossen Metallteilen verfälscht werden können. Bei der Nachbearbeitung lassen sich mehrere parallele Radargramme analysieren und die Störsignale mit geophysikalischen Prozessierungsschritten herausfiltern.

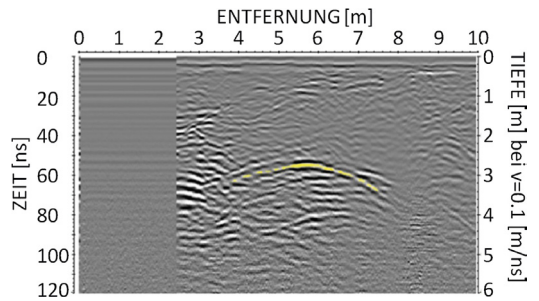


Fig. 9: Ausschnitt eines Radargrammes: Oben ist die Entfernung vom Startpunkt in Metern angegeben, auf der linken Seite die Laufzeit in Nanosekunden und auf der rechten Seite die Umrechnung in eine Tiefe.

Die Geschwindigkeit elektromagnetischer Wellen ist stark von der lokalen Untergrundbeschaffenheit abhängig. Die Extrema liegen bei 0.3 Meter pro Nanosekunde (m/ns) in Luft und 0.03 m/ns in Wasser. In natürlichem Baugrund bewegen sich die Werte zwischen 0.06 m/ns in wassergesättigten Ton und 0.13 m/ns in kristallinen Festgesteinen. Für die Rauhawacke wurde in den ersten Auswertungen ein Wert von 0.10 m/ns für die Tiefenumrechnungen eingesetzt.

In der Fig. 9 ist das Radargramm eines Karsthohlraumes dargestellt. Der starke, bogenförmige Reflektor in der bei 5.50 Meter Entfernung nach 50 Nanosekunden in einer Tiefe von 2.70 m zu sehen ist, muss also auf eine Änderung des elektrischen Widerstandes zurückzuführen sein.

Im Rahmen der darauffolgenden Sondierung mit einem Bagger wurde zunächst mitgeteilt, dass in der angegebenen Tiefe von 2.70 m kein Hohlraum zu finden sei. Eine angeordnete Vertiefung der Sondierung führte schliesslich zum Auffinden eines an dieser Stelle erwarteten Karsthohlraumes. Aus der nun bekannten Tiefe liess sich die tatsächliche Geschwindigkeit an dieser Stelle berechnen. Diese lag rund 10% über der ursprünglich angenommenen. Mit dieser Erkenntnis konnten die Tiefenangaben präzisiert werden.

#### 4.4 Aufbereitung der Radargramme und 3D Prozessierung

Bei einem Profilabstand von 50 cm lassen sich die Daten dreidimensional auswerten. Dazu wird zwischen den benachbarten Signalen linear interpoliert, um Ebenen und Querprofile zu errechnen. Aus den Ebenen, Längs- und Querprofilen wird im Anschluss ein Film erstellt, der auf dem Computer betrachtet sowie vor- und rückwärts bewegt werden kann. Auf diese Weise lassen sich räumliche Strukturen besser verfolgen.

Ein Beispiel dazu zeigt Figur 10. Es stellt den

Schnitt vom real gemessenen Längsprofil bei 14 m mit dem interpolierten Querprofil bei 13 m dar. Hier lässt sich deutlich ein Hohlraum erkennen. In dieser Darstellung wurden die starken Signale eingefärbt: Das Reflexionssignal (vgl. Fig. 7b) wurde ab einer oberen Grenze rot und ab einer unteren Grenze blau gefärbt.

#### 4.5 Interpretation und Darstellung der Resultate

Die mit den Radarmessungen lokalisierten

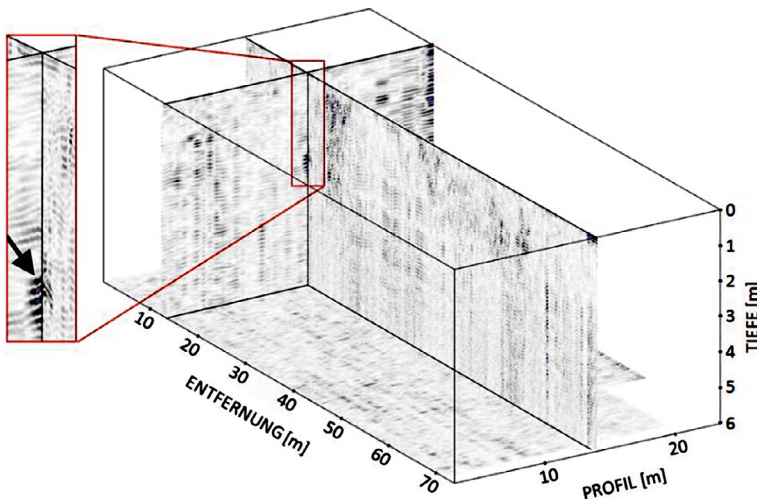


Fig. 10: Dreidimensionale Darstellung der Radardaten. Aufgenommen wurden Längsprofile. Querprofile und Ebenen wurden interpoliert.

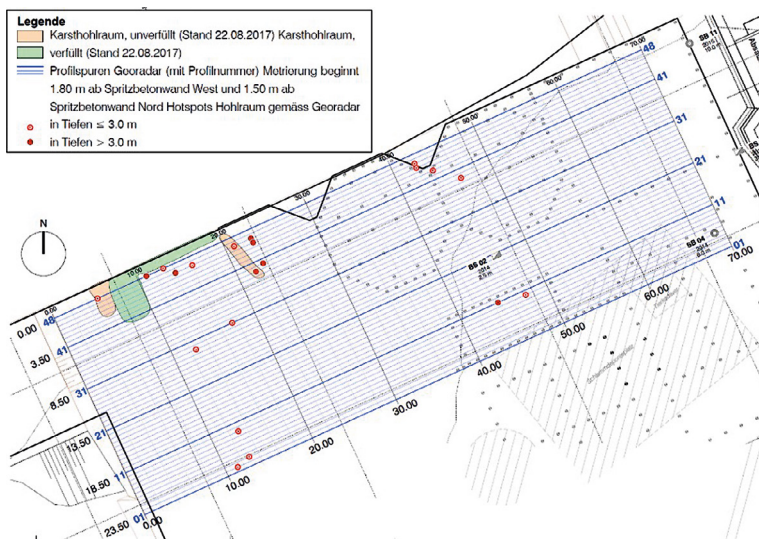


Fig. 11: Im Bauplan eingetragene vereinfachte Darstellung der Ergebnisse. Die blauen Linien entsprechen den aufgenommenen Profilen.





Fig. 12: Freigelegte Karsthohlräume in der zweiten Untersuchungsetappe. Davor der angelieferte Kiessand zur Verfüllung und Verdichtung (Bild Th. Rüegg, 03.11.2017).

«Hotspots» wurden in den Situationsplan der Baustelle eingetragen (Fig. 11). Um vereinfachte Aussagen zu treffen, wurde nur zwischen untiefen (leere Kreise in Tiefen  $\leq 3.0$  m), und tiefen Hotspots (ausgefüllte Kreise  $> 3.0$  m) unterteilt, wobei die Untiefen mit dem Bagger erreichbar sind.

#### 4.6 Folgerungen und bauliche Massnahmen

In allen vier Untersuchungsetappen liessen einige der Reflexionssignale mit hoher Wahrscheinlichkeit auf weitere Karsthöhlen schliessen. Tatsächlich wurden diese in der Folge auch festgestellt. An den Verdachtsstellen wurden im direkten Anschluss an die Messungen Nachgrabungen mit einem Bagger angeordnet. Die zum Teil beachtlichen Dimensionen der freigelegten Karsthohlräume zeigen die Figuren 12 und 13. Sämtliche freigelegten Hohlräume wurden mit Felsblöcken, Kiessand und Beton verfüllt. Insgesamt mussten über  $3000 \text{ m}^3$  Füllmaterialien aufgewendet werden.

## 5 Fazit

Das aufgrund der Resultate der Baugrunduntersuchungen als wenig wahrscheinlich eingestufte Risiko von Gipskarst zeigte sich während der Ausführung als erheblich.

Dank der Entscheidung, den Untergrund flächendeckend mittels Georadar zu kartographieren, konnten mehrere Karsthohlräume erkannt und so mögliche Schäden am Baukörper abgewendet werden. Auf dem untersuchten Areal können nun weitere Hohlräume ausgeschlossen werden.



Fig. 13: Das zuletzt vorgefundene Höhlensystem in der vierten Etappe. Rechts im Bild ein bereits fertiggestellter Teil der neuen ARA (Bild M. Berweger, 22.03.2019).

Auch in anderen Fällen lassen sich in Untergrundanomalien mit dieser Messmethode erkennen. Befindet sich ein Bauprojekt in einem geologisch heiklen Gebiet, so können mögliche Risiken ausser mit Bohrungen und Baggersondierungen auch mit Hilfe des Georadars erkannt werden.

## Referenzen

- Meier, E. & Huggenberger, P. 1992: Georadar zur Kartierung der ersten 10 bis 20 Meter des Untergrundes, «wasser, energie, luft – eau, énergie, air» Verbandszeitschrift des Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes S.111-113
- Rüegg, Th. 2015: Baugrunduntersuchung Vorprojekt, Neubau ARA Oberengadin, Parz. Nr. 312, Furnatsch, 7525 S-chanf