3. Zusammenfassung einer Publikation

Literaturangabe zur Publikation:

Fores, B., Champollion, C., Lesparre, N., Pasquet, S., Martin, A., and Nguyen, F., 2021, Variability of the water stock dynamics in karst: insights from surface-to-tunnel geophysics: Hydrogeology Journal, v. 29, p. 2077-2089.

3.1 Einleitung

Karbonat-Aquifere decken ca. ¼ des weltweiten Trinkwasserbedarfs. Karststrukturen innerhalb des Aquifers sind sehr heterogen, weshalb es schwierig ist ein räumlich präzises Modell zu entwickeln. Hier können geophysikalische Methoden einen wertvollen Beitrag leisten zur besseren Charakterisierung von hydrogeologischen Eigenschaften. Meist lohnt es sich mehrere verschiedene geophysikalische Methoden miteinander zu kombinieren.

In dieser Studie wird mittels unterschiedlicher Methoden der Hydrogeophysik die Wasserspeicherdynamik und deren Heterogenität in einem Karstaquifer in Südfrankreich untersucht. Ein 200 m langer Tunnel im Kalkstein bietet eine einzigartige Gelegenheit mittels geophysikalischer Untersuchungen einen Einblick in die ungesättigte Zone zu gewinnen. In einem Surface-to-tunnel Setting wird ein 2D-Modell des Karstaquifers erstellt.

3.2 Untersuchungsgebiet

Das Experiment wurde innerhalb und oberhalb des Saint-Ferréol-Tunnels durchgeführt. Dieser Tunnel befindet sich im Süden des Campestre Karstplateaus (Teil des Larzac Karstplateaus) im Süden Frankreichs. Das Campestre Karstplateau ist hauptsächlich aus Kalkstein, Dolomit und Mergel aufgebaut. Aufgrund der Verkarstung gibt es keinen konstanten Oberflächenabfluss. Das Karstwasser speist jedoch die «Foux de la Vis»-Quelle.

Der untersuchte Tunnel wurde bereits Ende des 19. Jahrhunderts für die Lagerung von Roquefort Käse angelegt und verbindet die Sohle einer Doline mit einem Hohlraum (vgl. Abb. 10). Der Eingang des Tunnels liegt ca. 30 m unterhalb des Plateaus. Der Hohlraum am 220 m entfernten Ende des Tunnels liegt ca. 60 m unterhalb des Plateaus. Im südlichen Bereich des Tunnels, in der Nähe des Eingangs kann nach intensiven Niederschlägen ein steter Wasserfluss beobachtet werden, welcher nach ein paar Wochen wieder versiegt. Im hinteren, nördlichen Teil des Tunnels kann ein konstantes Wassertröpfeln auch in Trockenzeiten beobachtet werden.

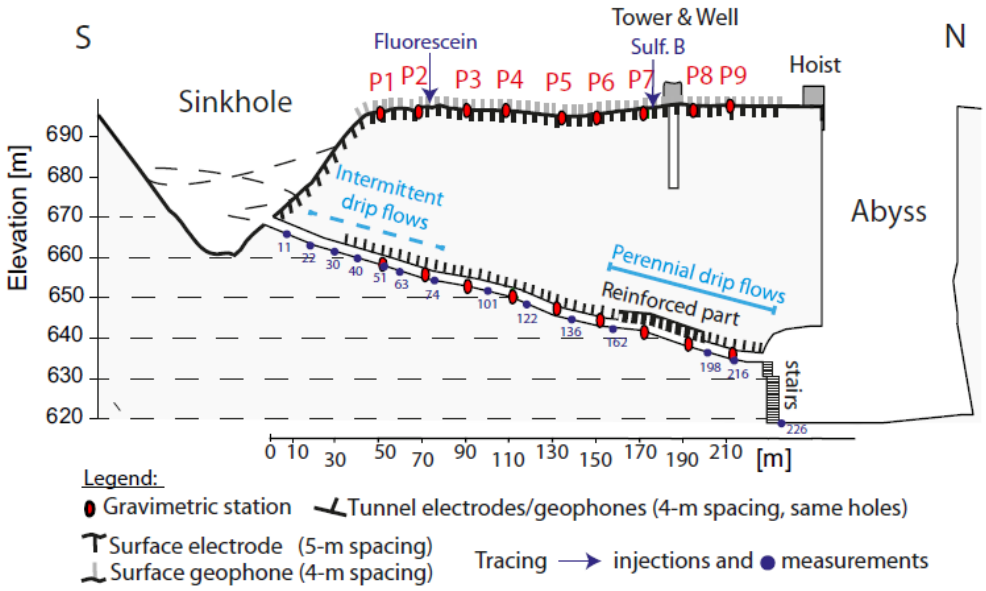

Abbildung 10: N-S Querschnitt entlang des Tunnels mit Anordnung der geophysikalischen Messinstrumente

3.3 Methoden

1) **Tomographie des elektrischen Widerstandes** (ERT; electrical resistivity tomography): Für die Erstellung einer Tomographie des elektrischen Widerstandes (ERT) wurden 48 Elektroden innerhalb und 48 Elektroden ausserhalb des Tunnels installiert. Sowohl im Tunnel als auch an der Oberfläche wurden je separat klassische Dipol-Dipol und Gradient Konfigurationen verwendet. Zusätzlich wurde zwischen Tunnel und Oberflächen in einer speziellen Dipol-Dipol Konfiguration gemessen.
2) **Seismische Refraktionstomographie (SRT):** Seismische Daten wurden mittels 48 Geophonen an der Oberfläche und 48 Geophonen im Tunnel gemessen.
3) **Zeitraffer-Mikrogravimetrie** (time-lapse micro-gravimetry): Im Tunnel und an der Erdoberfläche wurden 9 Paar Gravimetrie-Stationen eingerichtet. Die meisten der insgesamt 18 Stationen wurden im Minimum 3-mal pro Jahr gemessen: nach der feuchten Jahreszeit (Dezember/Januar), am Ende der Trockenzeit (August/September) und einmal dazwischen.
   Die Gravitätsunterschiede zwischen den Stationen im Tunnel und den Stationen an der Erdoberfläche über die Zeit erlauben es Rückschlüsse auf die Dichteunterschied im dazwischenliegenden Gesteinspaket zu ziehen. Nach Korrektur von Gezeiten und Atmosphärendruck können diese Unterschiede nur noch auf den unterschiedlichen Wassergehalt zurückgeführt werden.
4) **Tracerversuche:** Ein Multitracer Experiment erlaubt es Rückschüsse über den Transport und dessen räumliche Verteilung zu ziehen. Zwei Tracer wurden eingegeben. Einer davon im Bereich des Tunneleingangs der andere im Bereich des Tunnelendes. Das Wasser im Tunnel wurde regelmässig beprobt und mittels Spektralfluorometer analysiert.

3.4 Resultate

1) **ERT:** Im Bereich der Erdoberfläche zeigt sich ein geringer elektrischer Widerstand. Im Bereich der Tunneldecke ist der elektrische Widerstand eher hoch. Der Übergang von einer Zone geringen Widerstands zu einer Zone hohen Widerstands ist nicht immer klar ausmachbar (zu geringe Sensitivität; vgl. Abb. 11).
2) **SRT:** Im oberflächennahen Bereich (ca. 0-3 m Tiefe) ist die p-Wellen-Geschwindigkeit am tiefsten. Danach zeigen sich mittlere Geschwindigkeiten und in der Nähe des Tunnel erreichen die p-Wellen ihre höchste Geschwindigkeit.
3) **Dichte-Profile:** Aus den gravimetrischen Unterschieden wurde Dichte und Porosität abgeleitet. Es zeigt sich, dass die Dichte am Ende des Tunnels am grössten ist. In diesem Bereich ist auch die Porosität am niedrigsten.
4) **Änderungen des Wasserspeichers:** Gravitätsänderungen konnten gut mit meteorologischen Daten korreliert werden. Jedoch zeigen sich v.a. in den vorderen 5 Messstationen (Tunneleingang bis ca. 150 m) grosse Änderungen des Wasserspeichers. Im hinteren Bereich des Tunnels zeigen sich kaum mehr Änderungen des Wasserspeichers.
5) **Tracer:** Für beide Tracer wurden die höchsten Rückgewinnungsraten / Konzentrationen nach ca. 2 Monaten gemessen. Der Tracer, welcher im südlichen Bereich des Tunnels eingegeben wurde, wurde aber bereits nach wenigen Tagen erstmals nachgewiesen.

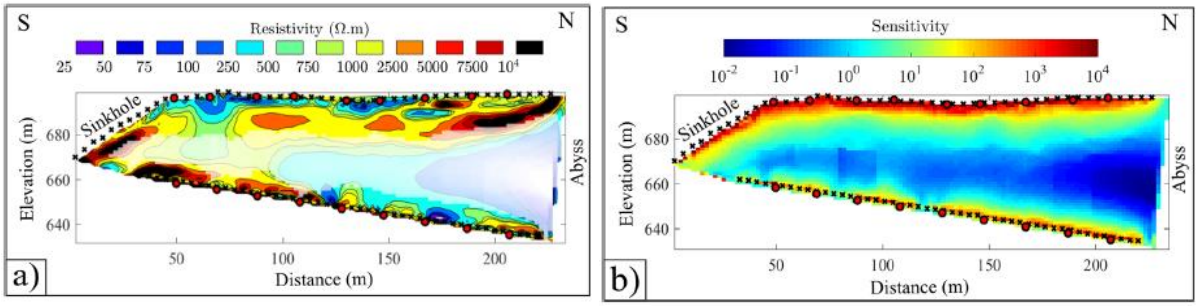

Abbildung 11: a) Tomographie des elektrischen Widerstands, b) Sensitivitätsanalyse der ERT-Methode

3.5 Diskussion und Schlussfolgerung

- ERT und SRT zeigen eine wasserdurchlässige Zone an der Erdoberfläche, das sogenannte Epikarst. Diese Zone ist meistens ca. 5 m tief. In einem Bereich reicht sie bis ca. 20 m in die Tiefe.
- Unterschiede des elektrischen Widerstandes können auch auf einen erhöhten Tonmineralgehalt zurückgeführt werden. Die P-Wellen Geschwindigkeit wird dadurch jedoch nicht so stark beeinflusst.

- In Bereichen schneller p-Wellen-Geschwindigkeit im Norden des Tunnels ist der Kalkstein sehr kompakt und nur wenig verwittert.
- Im südlichen Bereich gibt es grössere Wasserspeicheränderungen. Das Epikarst bildet in niederschlagsreichen Perioden ein Reservoir, von dem aus dem Wasser via Brüche nach unten transportiert wird. Im Südlichen Teil des Tunnels gibt es eine schnelle, unmittelbare Abflusskomponente (Wassertransport via offene Bruchstrukturen) und eine langsame Abflusskomponente mit einer Aufenthaltszeit von ca. 2 Monaten.
- Im nördlichen Bereich ist die Zone des Epikarst nur sehr geringmächtig ausgebildet. Der Kalkstein ist intakt und nur wenig verwittert. Es gibt zwar Bruchstrukturen, doch diese sind oft mit Tonmineralen «verstopft». Deshalb gibt es kaum Änderungen des Wasserspeichers. Wasser kommt trotzdem bis zum Tunnel, jedoch mit grosser Verzögerung, weshalb es auch keine Rolle spielt, wenn es längere Zeit trocken bleibt.

Ein hydrogeologisches Modell auf Basis der oben aufgeführten Interpretationen und Schlussfolgerungen ist in Abb. 12 dargestellt.

Die Surface-to-tunnel Messungen erlauben es, ein besseres Verständnis für die hydrogeologischen Prozesse in einem heterogenen Karstaquifer zu erlangen. Eine entscheidende Rolle für den Eintrag des Niederschlagswassers in den Kalkstein spielt das Epikarst, welches in unterschiedlicher Mächtigkeit ausgebildet ist und ca. 80% der Niederschläge speichern kann. Die Kombination unterschiedlicher Methoden der Hydrogeophysik und der Hydrologie ermöglicht ein besseres Verständnis eines Systems, bei dem direkte Beobachtung nicht möglich ist.

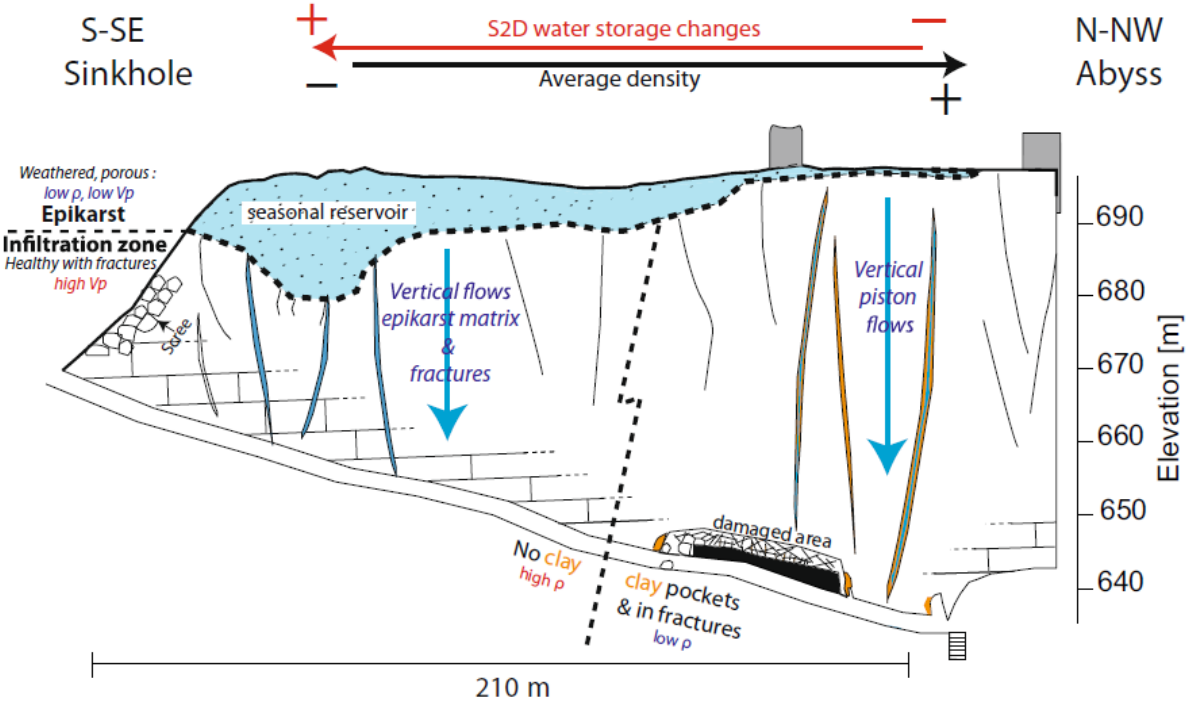

Abbildung 12: Visualisierte Darstellung der Interpretationen für das Untersuchungsgebiet auf Basis der durchgeführten Untersuchungen