

Projektnummer: 307
GRANIT UND WASSER

**Erstellung einer Studie und Erstellung von Texten für
Informationsmaterialien**

Teil 1:

**Wasserversorgungsstollen
im bayerisch-tschechischen Grenzgebiet**

**Auftraggeber: Museum Sokolov, Beitragsorganisation der Region
Karlovy Vary**

Bearbeitet von: RNDr. Jaromír Tvrdý, Azalková 522, 460 15 Liberec



Cíl EÚS
Česká republika –
Svobodný stát Bavorsko
2014–2020



Evropská unie
Evropský fond
pro regionální rozvoj

Projekt: GRANIT UND WASSER

Projektnummer: 307

Ziel des Projekts: Erschließung, Bewertung und Verbindung einiger wertvoller geologischer und montanhistorischer Denkmäler des bayerisch-tschechischen Grenzgebietes. Konkret handelt es sich um die Grube Jeroným in der Gemeinde Rovná im Bezirk Sokolov, Sanierung eines ehemaligen Betriebsgebäudes am Schlossberg bei Flossenbürg und die Rekonstruktion von zwei Brunnen und einem Wasserwerk in Planá. Hinzu kommen diverse Marketing-Maßnahmen.

Finanzierung: Das Projekt wird finanziert aus Mitteln der Europäischen Union, des operationellen Programmes für die grenzüberschreitende Zusammenarbeit Tschechische Republik - Freistaat Bayern Ziel ETZ 2014-2020.

Empfänger des Zuschusses: Museum Sokolov, Beitragsorganisation der Region Karlovy Vary



Ziel ETZ
Freistaat Bayern – Tschechische Republik
2014 – 2020 (INTERREG V)



Europäische Union
Europäischer Fonds für
regionale Entwicklung

INHALT

Text

1	GRUNDLEGENDE INFORMATIONEN ÜBER DAS GEBIET	5
1.1	Naturräume	5
1.2	Geologie der Region Karlovy Vary	5
1.3	Hydrogeologische Bezirke	10
2	WASSER UND SEINE GEWINNUNG	12
2.1	Oberflächenwasser	12
2.2	Grundwasser	13
3	QANATE.....	16
3.1	Iran und Südwestasien	20
3.2	Mittelasien.....	28
3.3	Südasien	28
3.4	Ostasien	30
3.5	Nordafrika.....	31
3.6	Lateinamerika	33
3.7	Europa	35
4	QANATE IM BAYERISCH-BÖHMISCHEN GRENZGEBIET	40
4.1	Wassergewinnungsstollen im Raum Selb.....	44
4.2	Wassergewinnungsstollen im Raum Aš	47
4.3	Weitere Objekte im Gebiet des Geoparks	53
5	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN	57
7	LITERATUR.....	60

Anhang

ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNG DER HORIZONTALEN WASSERSTOLLEN BEI AŠ

1. Aš – Skřivánčí vrch
2. Aš-Mokřiny 1
3. Aš-Mokřiny 2
4. Vernéřov
5. Dolní Paseky 1 a 2
6. Podhradí
7. Štítary

Einführung

Die vorliegende Studie wurde auf der Grundlage eines zwischen dem Auftraggeber und dem Auftragnehmer im Februar 2021 abgeschlossenen Werkvertrages erstellt. Gegenstand der Arbeiten ist demnach die Lieferung einer Studie mit Outputs für Informationselemente sowie die Teilnahme an Vorträgen und einer Fachexkursion im Rahmen des grenzüberschreitenden Kooperationsprojektes "Granit und Wasser". Das Werk besteht aus zwei Teilen, und zwar:

1) Erstellung einer Studie (in tschechischer und deutscher Sprache) zum Thema Qanate, d.h. Datensammlung und -aufbereitung zum Thema Stollen zur Wassergewinnung im bayerisch-tschechischen Grenzgebiet.

2) Vorbereitung der Texte (in tschechischer und deutscher Sprache) für QR-Codes, Informationstafeln und Publikationen zur Geotour Wasser und Geotour Granit sowie Fertigstellung von Unterlagen für eine thematische Ausstellung. Neben dem Textteil von 50 A4-Seiten umfasst der Inhalt auch Bildmaterial, d.h. Fotos, Karten, historische Abbildungen usw.

Der erste Teil der Arbeit ist der Inhalt des hier vorgelegten Dokuments.

1 Grundlegende Informationen über das Gebiet

1.1 Naturräume

Der größte Teil der Region Karlovy Vary gehört naturräumlich zum Erzgebirgssystem. Das Böhmerwaldsystem erstreckt sich bis in den südwestlichen Teil und das Berounka-System bis in den Süden. Die Einteilung in naturräumliche Einheiten ist in der folgenden Abbildung zu sehen.

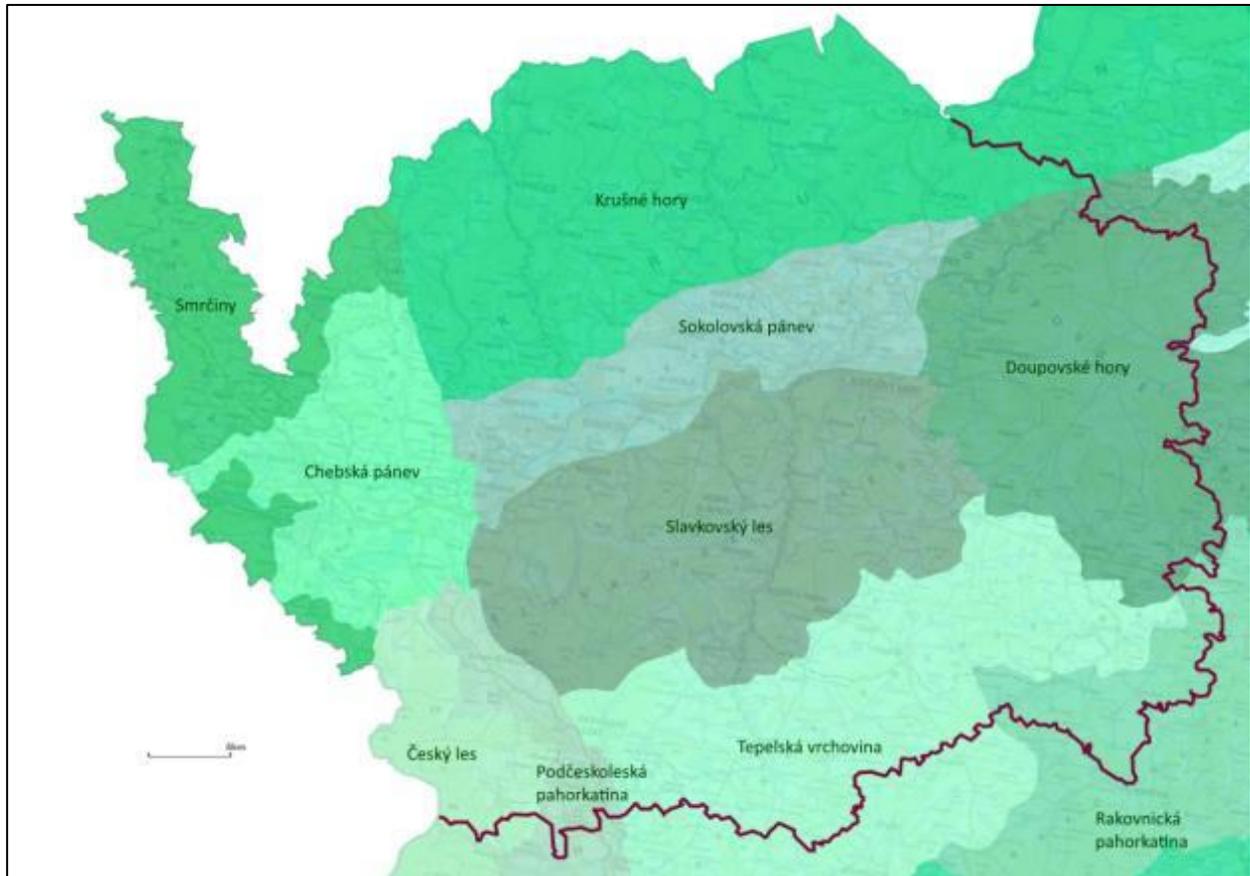


Abb. 1. Naturräumliche Einteilung der Region Karlovy Vary (<https://aopkcr.maps.arcgis.com>).

1.2 Geologie der Region Karlovy Vary

Der folgende Text ist mit geringfügigen Änderungen aus dem Dokument „Regionale Rohstoffpolitik der Region Karlovy Vary“ (TAČR 2021) übernommen.

Die geologische Struktur des Gebiets der Region Karlovy Vary ist sehr vielfältig. Der nördliche Teil wird von den so genannten Saxothuringischen Einheiten (Erzgebirgskristallin, Erzgebirgspluton und thüringisch-vogtländisches Paläozoikum) aufgebaut. Im südlichen Teil der Region erstrecken sich das Moldanubikum des Böhmerwaldes und das Teplá-Kristallin. Bei den jüngeren geologischen Einheiten handelt es sich um tertiäre Ablagerungen der Untererzgebirgsbecken (einschließlich einiger isolierter Relikte im Erzgebirge; Egergraben) und um Produkte einer ausgedehnten neovulkanischen Tätigkeit. Quartäre Ablagerungen kommen auf dem Gebiet der Region Karlovy Vary eher vereinzelt vor. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Gehänge- und Auensedimente, von denen die wichtigsten die Terrassenkiese des Flusses Ohře und die Ablagerungen am Fuße von Bergen und Hügeln. Lösslehme bilden in Niederungen stellenweise ausgedehnte Horizonte. Torf und Torfmoore kommen in den

Gebirgsregionen vor. Bedeutend sind anthropogene Ablagerungen, insbesondere Abraumhalden aus dem Braunkohlen-Bergbau sowie des historischen Bergbaus auf Bodenschätze (Zinn, Uran).

Das Erzgebirgskristallin wird im Südosten durch die Erzgebirgsrand- und Litoměřice-Verwerfungen begrenzt. Die Mittelsächsische Überschiebung begrenzt die Einheit im Nordosten. Im N und NW trifft es auf das vogtländisch-sächsische Paläozoikum. Alle Gesteine des Erzgebirgskristallins sind stark verfaltet und vermutlich zweistufig regionalmetamorph geprägt. Das Erzgebirgskristallin wird als ein Migmatitkomplex angesehen, der während der Cadomischen Orogenese aus Gesteinen des Proterozoikums gebildet und später durch paläozoische oder variszische Gebirgsbildungsprozesse überformt wurde. Der Gneiskern wird von Glimmerschiefern und peripher von noch schwächer metamorphen Phylliten flankiert. Die Gneise erstrecken sich bis in das Gebiet von Jáchymov. Der Großteil der Glimmerschiefer-Gneise, Glimmerschiefer und ein Teil der Phyllite nordöstlich von Jáchymov (bis zur Staatsgrenze) sowie das angrenzende Grundgebirge des Sokolov-Beckens gehören zum so genannten Grenzkomplex. Am Ende der variszischen Faltung drangen granitische Intrusionen in mehreren Phasen in das Kristallin ein, die im Grundgebirge zu einem einzigen großen Erzgebirgspluton verbunden sind. Der zentrale Teil des Plutons ragt in einem breiten, in Nord-Süd-Richtung verlaufenden Streifen, dem Karlovy Vary-Granitmassiv, aus der heutigen Oberfläche.

Das Karlsbader Granitmassiv ist Teil des so genannten Erzgebirgsplutons, das jedoch in Bezug auf die Richtungsstrukturen des Erzgebirges eine ausgeprägte Querstellung aufweist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich hier zwei variszische tektonische Hauptlinien, die Erzgebirgs- und die Litoměřice-Linie, sowie die Störungszone der Joachimsthaler Richtung kreuzen. Das Alter des Plutons ist spätvariszisch.

Im Karlsbader Massiv kommen zwei Haupttypen von Granitoiden vor, die als ältere und jüngere Intrusivkomplexe klassifiziert werden. Zu dem ersten gehören die sogenannten *Gebirgsgranite*, die älter sind. Es handelt sich um mittel- und grobkörnige, meist porphyrische, biotitreiche Granite und Granodiorite. Die Granite dieser Gruppe sind häufig hybrid und bilden eine Art Hochtemperatur-Kontaktalteration in der Biotit-Cordierit-Sillimanit-Amphibol-Fazies aus. Die Hauptvorkommen des Gebirgsgranits liegen im Nordosten, zwischen dem Slavkov-Kristallin und dem Duppauer Gebirge.

Der zweite Typ sind die sog. *Erzgebirgsgranite*. Diese sind jünger und durchdringen sowohl den Gebirgsgranit als auch verschiedene stratigraphische Einheiten des Kristallins. Das Hauptvorkommen der erzgebirgischen Granite liegt im zentralen Teil des Plutons. Ihr charakteristisches Merkmal ist die pneumatolytisch-hydrothermale Alteration in Verbindung mit Albitisierung, Biotit-Alteration, Serizitisierung, Topas-, Turmalin- und Fluoritbildung sowie die lokale Vergreisung und Bildung von Lithium- und Zinn-Wolfram-Vererzungen.

Das vogtländisch-sächsische Paläozoikum befindet sich im nördlichen Teil des Aš-Gebiets, in der Umgebung von Cheb und Kraslice. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Gesteinsgruppen aus dem Ordovizium, die grünschieferfaziell geprägt sind. Die Regionalmetamorphose wird jedoch stark von der Kontaktmetamorphose der Granite der Karlsbad- und Fichtelgebirgsmassive überlagert. Im Ascher Ländchen beginnt das Paläozoikum mit der Frauenbach-Formation, mit zahlreichen Quarziten und gebänderten Quarzitschiefern, setzt sich mit der Phycoden-Formation fort, die hauptsächlich quarzitisch ausgebildet ist, und endet mit

einem geringen Vorkommen der Gräfenenthal-Gruppe. Eine ähnliche Abfolge ist aus dem Kraslice-Gebiet bekannt.

Das Fichtelgebirge-Kristallin folgt der südwestlichen Grenze des vogtland-sächsischen Paläozoikums, seine südliche Grenze wird durch den Kontakt mit dem Erzgebirgspluton und die tektonisch bedingte Grenze des Egerer Beckens gebildet. Es besteht hauptsächlich aus Phylliten, Glimmerschiefern und Paragneisen.

Das Teplá-Kristallin liegt nördlich des Barrandium-Proterozoikums, aus dem es sich langsam entwickelt, indem es die Intensität der regionalen Metamorphose erhöht. Seine südöstliche Grenze wird konventionell mit der so genannten Biotit-Isograden gleichgesetzt, die nordwestliche Grenze ist identisch mit der Grenze des Bohemikums und Saxothuringikums (die so genannte Litoměřice-Tiefenstörung). Im Nordosten ist das Teplá-Kristallin unter Permokarbon-Sedimenten und Vulkaniten des Duppauer Stratovulkans begraben. Im Südwesten bildet die Marienbader Verwerfung die Grenze des Teplá-Kristallins. Das Teplá-Kristallin ist ein Antiklinorium, das aus Metapeliten und Metapsammiten aufgebaut ist, deren Metamorphose in einer raschen Abfolge von Zonen von Biotit über Granat, Staurolith und Kyanit bis zur Rutilzone im Marienbader Metabasitkomplex aufsteigt. Petrographisch handelt es sich um eine Abfolge von Zweiglimmer-Phylliten, Zweiglimmer-Granat-Phylliten sowie Zweiglimmer-Gneisen und Biotit-Gneisen. Stratigraphisch gehören die Gesteine zum Neoproterozoikum.

Der Marienbader Metabasitkomplex bildet den nördlichen Teil des Teplá-Plateaus und den südlichen Teil des Slavkovský les. Es handelt sich um ein Synklinorium, das hauptsächlich aus regional metamorphosierten basaltischen Gesteinen mit tholeiitischem Charakter besteht, die teilweise reich an Aluminium sind. Die Gesteine sind in der Amphibolit- und wahrscheinlich Eklogit-Fazies in verschiedene Amphibolit- und Eklogit-Typen umgewandelt, die manchmal Kyanit enthalten. Jenseits der Litoměřice-Tiefenverwerfung, deren Verlauf an der Oberfläche durch langgestreckte Körper aus Serpentiniten bei Prameny (ursprünglich Dunite und Eklogite) gekennzeichnet ist, nimmt die Intensität der Metamorphose in Richtung des Slavkovský les wieder ab. Die Eklogite sind mit Metavulkaniten verbunden und wurden durch eine Hochdruckmetamorphose gebildet.

Das Slavkov-Kristallin wird als eine regional-metamorphe oberproterozoische Einheit angesehen, die durch Kontakteinwirkung variszischer Granitoide geprägt wurde. Es wird von Sillimanit-Biotit-reichen und von Zweiglimmer-Paragneisen bis Glimmerschiefern mit Erlan- und Quarzit-Lagen aufgebaut. Das Slavkov-Kristallin ist von Granitoiden des Karlsbad-Massivs durchdrungen. Im Osten, etwa ab der Linie Bečov-Karlovy Vary, grenzt ein Körper aus porphyrischem Biotit-reichem Granit an den Slavkov-Kristallin. Porphyrischer Biotit-Granit und feinkörniger Zweiglimmer-Granit intrudierten ebenfalls in die Slavkov-Kristallinität von Norden her, aus der Umgebung von Sokolov und Loket. Praktisch im Kern des Slavkov-Kristallins befindet sich die Obergrenze eines großen Körpers aus Erzgebirgsgranit, der sich weit nach Süden in das Žandov-Massiv und weiter nach Südosten in das Grundgebirge des Marienbader Komplexes erstreckt.

Die Untererzgebirgsbecken (Egergraben) umfassen drei tertiäre limnische Becken im Nordwesten der Tschechischen Republik, die in einer SW-NE-Linie in der Reihenfolge Cheb- (Eger-), Sokolov- (Falkenau-) und Most-Becken (Brux-, Nordböhmen-, in der Ústí-Region) angeordnet sind. Die Cheb- und Sokolov-Becken werden von Fichtelgebirgs-Graniten, Phylliten der Cheb-Formation bzw. Arzberg-Gruppe (Saxothuringikum), Slavkov- und Erzgebirge-Kristallin

und dem Karlsbader Granitmassiv unterlagert. Vor der eigentlichen Sedimentation der tertiären Beckenfüllung wurden diese Gesteine kaolinisiert, oft bis in große Tiefen (50-70 m).

Die heutige Ausdehnung der Sedimente ist ein Relikt der Auffüllung einer großen Absenkung, die sich seit dem Ende des Paläogens im Zusammenhang mit der Absenkung des Egergrabens im Rahmen neotektonischer Aktivität gebildet hat. Die Becken wurden in der Zeit vom oberen Eozän bis zum mittleren Miozän gefüllt. Die Auffüllung wird in Staré Sedlo-, Nové Sedlo-, Sokolov- und Cypris-Formationen gegliedert. Im Egerer Becken überlagert die Vildštejn-Formation (Pliozän) das ältere Tertiär diskordant. Im Rahmen der tektonischen Absenkung des Egergrabens kam es zu einer intensiven vulkanischen Aktivität.

Die basalen Schichten der **Staré Sedlo-Formation** (oberes Eozän bis unteres Oligozän), die auf kaolinisiertem Grundgestein aufliegen, sind in dem Gebiet als unregelmäßige Relikte unterschiedlicher Mächtigkeit (max. 40 m) vertreten. Es handelt sich um lithologisch variable Sedimente mit Übergängen von grobkörnigen, sandigen bis kiesigen Ablagerungen über feinkörnigen, manchmal intensiv verkieselten Quarzit-Sandsteinen bis hin zu sandigen Tonen. Nach einem Hiatus entstand die **Nové Sedlo-Formation** mit den Davidov-Schichten, der Braunkohlen-Formation Josef und den vulkanogenen Chodov-Schichten (Oligozän bis unteres Miozän, max. 270 m mächtig). Die Mächtigkeit der Josef-Schichten ist sehr unterschiedlich, häufig sind sie in zwei bis drei Kohleflöze unterteilt, die durch tonige Zwischenschichten getrennt sind. Die vulkanischen Ablagerungen sind überwiegend tonig und zu Bentonit umgewandelt. Jünger ist die **Sokolov-Formation** (Untermiozän, maximale Mächtigkeit bis zu 300 m), in der sich lakustrine und fluviale klastische Sedimente mit Ablagerungen vulkanischen Ursprungs abwechseln und die durch das Vorhandensein der so genannten Hauptflözzone (Flöz Anežka/Agnes, Zwischenflöz und Flöz Antonín/Antoni) von besonderer Bedeutung ist. Das Hangende bildet die limnische **Cypris-Formation**, bei der es sich überwiegend um blaugraue oder im höheren Abschnitt um bräunlich-graue bituminöse Tone und Tonsteine mit einer Mächtigkeit von bis zu 180 m handelt (Miozän).

Nach einer längeren Abtragungsphase wurden im Egerer Becken Tone und Sande der jüngsten Stufe abgelagert (**Vildštejn-Formation**). Diese enthält bedeutende Lagerstätten von keramischen Tonen. In den liegenden **Vonšov-Schichten** handelt es sich um hochplastische sog. Blautone, in den hangenden **Nová Ves-Schichten** um feuerfeste Porentone. Am Ende des jüngsten Sedimentationsstadiums sind Sande und teilweise Kiese abgelagert.

Das Egerer Becken hat eine Fläche von etwa 300 km² und eine erhebliche Ausdehnung. Das Egerer Becken ist heute vom Sokolov-Becken durch die Kristallinschwelle von Maria Kulm getrennt (500 bis 1000 m breit bei Kačerov und Lítov). Während des Tertiärs bildeten das Egerer und das Sokolov-Becken ein einziges Sedimentationsgebiet, das durch die tektonische Aktivität entlang der Marienbader Störung zerschnitten wurde. An die tektonischen Störungszonen im Egerer Becken sind die zahlreichen CO₂-Austritte gebunden (Tal des Flusses Plesná, Nationales Naturreservat Soos, Mineralquellen in Franzensbad).

Das Sokolov-Becken hat im Gegensatz zu den anderen Becken des Egergrabens neben seinem Hauptteil eine in kleinere Becken verteilte Füllung, die die Vertiefungen zwischen den größeren Erhebungen des Beckengrundes ausfüllt. Das größte der Relikte bildet im Nordosten das isolierte Hroznětín-Teilbecken. Insgesamt sind die Relikte in einem Streifen in Richtung NE zusammengefasst, der von der Erzgebirgs-Südrandverwerfung im NW und der Eger-Verwerfung im SE begrenzt wird und mehr als 200 km² umfasst. Im Osten wird das Gebiet durch den

Übergang der Beckensedimente in den Komplex der Neovulkanite des Duppauer Gebirges begrenzt.

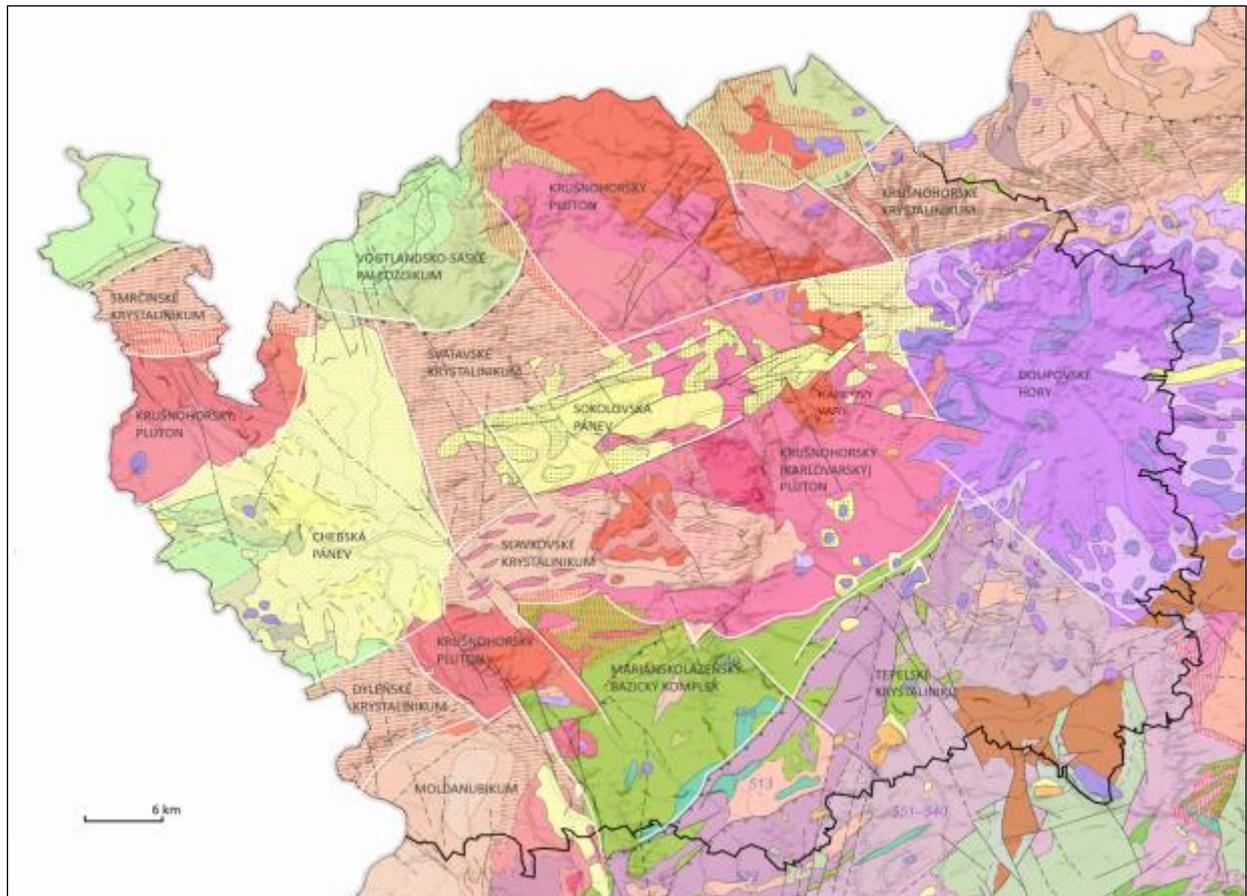


Abb. 2. Schematische geologische Karte der Region Karlovy Vary (<https://mapy.geology.cz/geocr500/>).

Die Neovulkanite bildeten sich in Verbindung mit dem Eger-Graben in mehreren Stadien, die verschiedene Arten von alkalischen Gesteinen hervorbrachten (Prärift-, Synrift- und Postrift-Phasen). Der Neovulkanit-Komplex von Doupovské hory (Duppauer Gebirge) entstand während des oberen Eozäns bis zum unteren Miozän. Das Duppauer Gebirge trennt das Sokolov- und das Most- (Nordböhmisches) Becken und umfasst eine Fläche von etwa 1.200 km². Es befindet sich am Schnittpunkt der in NE-Richtung verlaufenden Verwerfung (südliche Randverwerfung des Sokolov-Beckens, sog. Střezov-Verwerfung) mit der Verwerfung der tiefreichenden Jáchymov-Störungszone (welche die östliche Grenze des Karlsbader Massivs markiert). Nach NW werden die Becken von der Erzgebirgs-Südrandverwerfung begrenzt, nach SE erstrecken sie sich nur geringfügig über die Podbořany-Verwerfung und ihre südwestliche Fortsetzung. In der Mitte erreicht die Mächtigkeit der Laven und Pyroklastika fast 1 km (unvollständig, teils abgetragen). Der Zuführungskanal befindet sich im zentralen Teil des Komplexes und ist mit Essexit gefüllt. Die basalen Schichten enthalten eine lithologisch vielfältige Ansammlung von hauptsächlich subaquatischen Pyroklastika (Tuffe, Tuffite, tuffitische Tone), die in subaerische Pyroklastika übergehen. In höheren Lagen treten in diesen Lavaströme auf, die sich dann mit den Pyroklastika abwechseln. Die Laven machen 20 % und die Pyroklastika 80 % des Duppauer Gebirges aus. Die Lavaströme beginnen mit ultrabasischen Leucititen, gefolgt von basischen tephritischen Laven und schließlich olivinfreien Basalten. Jüngere neovulkanische Phasen sind

im Duppauer Gebirge nicht vertreten. Die jüngsten Erscheinungen vulkanischer Aktivität in der Egergrabenzonen gehören zeitlich zum Pleistozän (Železná und Komorní hůrka / Eisen- und Kammerbühl).

Die tertiäre Tektonik ist ein entscheidender Faktor in der geologischen Entwicklung des größten Teils der Karlsbader Region. Bei den wichtigsten tektonischen Linien handelt es sich nicht um einfache Bruchlinien, sondern um breite Zonen, die aus mehreren parallelen Verwerfungen bestehen. Einzelne Störungen wurden nacheinander in verschiedenen Zeiträumen gebildet und aktiviert. Die daraus resultierende Form wurde durch die Reaktivierung während der Kreide- und Tertiärzeit erreicht. Die meisten Verwerfungen gehören zu NW-SE- und NE-SW-verlaufenden Systemen. Die wichtigsten Verwerfungen des NE-SW-Systems sind die Erzgebirgs-Randverwerfung im Norden und die Eger-Verwerfung im Süden. Sie begrenzen die tertiären Sedimentbecken gegen den Erzgebirgs-Pluton. Unter den Querverwerfungen sind die bekanntesten das Jáchymov Störungssystem, die Chodov-Verwerfung und die so genannte Karlsbader Sprudellinie sowie im Westen die Svatava- und Marienbader Verwerfungen. Eine Reihe mehr oder weniger bedeutender tektonischer Linien verläuft parallel zu ihnen. Tiefreichende Verwerfungen in Verbindung mit massiven Kohlenstoffdioxid-Austritten sind die Grundlage für die Entstehung der Karlsbader Quellen.

1.3 Hydrogeologische Bezirke

Ein hydrogeologischer Bezirk ist ein Gebiet mit ähnlichen hydrogeologischen Bedingungen, Grundwasserleitertypen und Grundwasserströmungen, das aus einem oder mehreren Grundwasserkörpern besteht. Es wird auf der Grundlage der natürlichen Eigenschaften des tiefen Deckgebirges, des Grundgebirges und des tiefen Grundwasserleiters definiert. Dieser Prozess wird in Tschechien durch die Verordnung Nr. 5/2011 Slg. über die Definition von hydrogeologischen Bezirken und Grundwasserkörpern, die Methode zur Bewertung des Grundwasserzustands und die Anforderungen an die Programme zur Erfassung und Bewertung des Grundwasserzustands in ihrer geänderten Fassung geregelt (https://cs.wikipedia.org/wiki/Hydrogeologický_rajon).

Der nordwestliche Teil der Region Karlovy Vary wird von dem hydrogeologischen Bezirk 6111 „Kristallin des Fichtelgebirges und dem westlichen Teil des Erzgebirges“ eingenommen, das in Gesteinen des Proterozoikums und Paläozoikums liegt. Der Bezirk erstreckt sich über eine Fläche von 700.825 km² und liegt mit Ausnahme eines Teils des Ascher Ländchen im Einzugsgebiet der Eger.

Aus hydrogeologischer Sicht besteht der Bezirk 6111 aus zerklüfteten Grundwasserstrukturen in regelmässig (Paragneise, Glimmerschiefer, Phyllite) sowie unregelmässig geklüfteten Gesteinen (Granite, Orthogneise), einschließlich der durchdringenden Grundwasserleiter ihrer Überdeckung. Die variskischen Granitoide sind für die Grundwasserzirkulation von größerer Bedeutung, da das Netz von Störungen und Verwerfungen stark unterbrochen ist und die meisten davon in größeren Tiefen durchlässig sind. Ihr sandiger bis sandig-toniger Verwitterungsmantel schafft zudem relativ günstige Bedingungen für die Grundwasserzirkulation. Die Grundwasserakkumulation erfolgt in der unterirdischen Trennungszone, die den verwitterten Mantel und die darüber liegende verwitterte und zerklüftete Felszone umfasst. Die Anreicherung erfolgt überwiegend durch atmosphärische Niederschläge, wobei die Menge des infiltrierten Wassers von der hydrogeologischen Beckenfläche, der Geländemorphologie und der Durchlässigkeit des verwitterten Erdbodens abhängt. Der Grundwasserspiegel ist frei (Olmer et al. 1990).

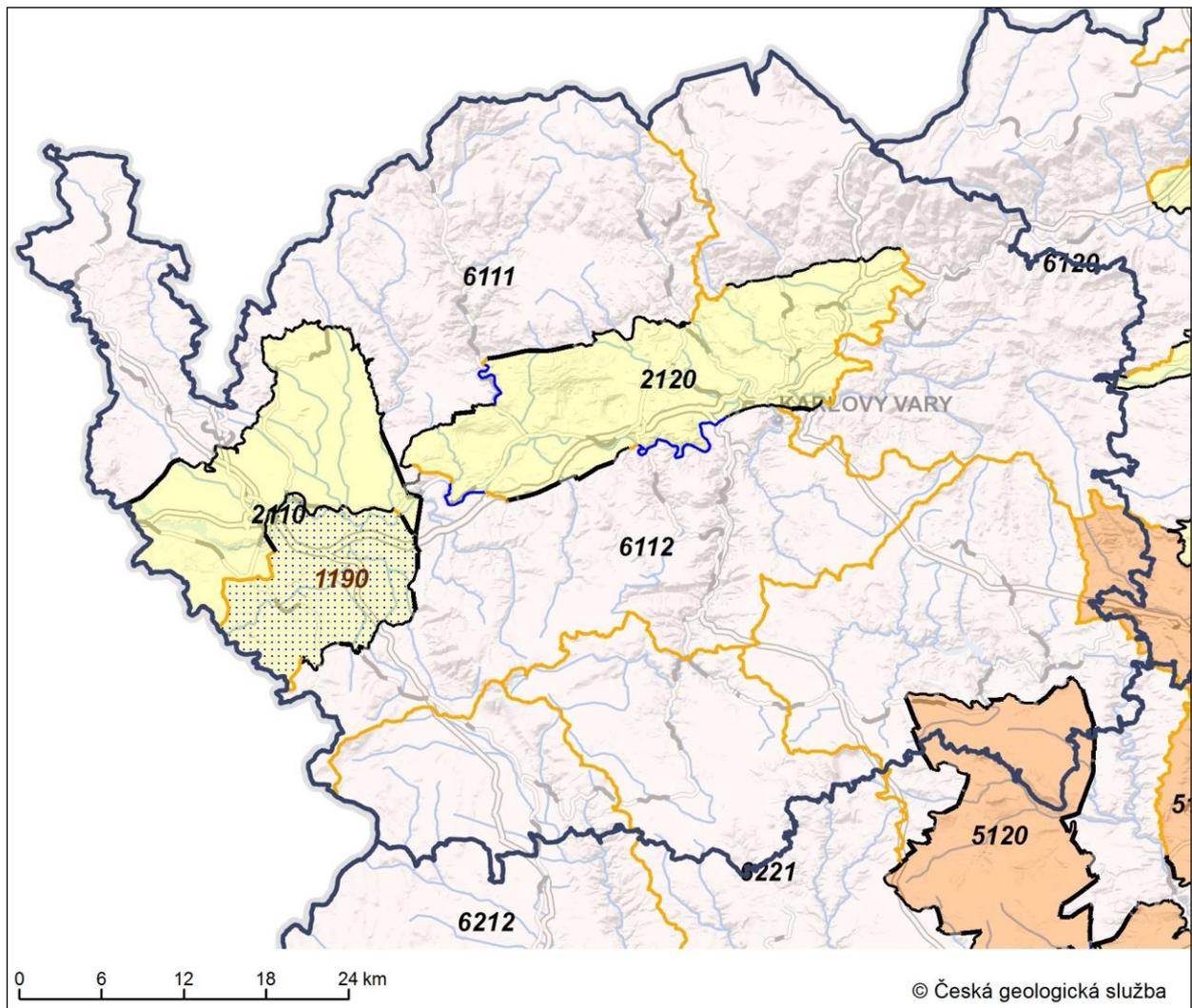


Abb. 3. Hydrogeologische Bezirke (mapy.geology.cz/).

2 Wasser und seine Gewinnung

Nur ein winziger Prozentsatz des Wassers auf der Erde ist für die Trinkwassergewinnung geeignet. Dies ist auch der Grund, warum etwa ein Fünftel der Weltbevölkerung derzeit keinen ausreichenden Zugang zu sauberem Trinkwasser hat. Trinkwasser wird im Allgemeinen durch die Aufbereitung von Rohwasser aus Quellen gewonnen. Wasserquellen können Grundwasser oder Oberflächenwasser sein. Aus einigen Quellen (insbesondere Grundwasser) kann Trinkwasser ohne Aufbereitung gewonnen werden. Meistens wird das Rohwasser in Aufbereitungsanlagen geleitet, wo es zu Trinkwasser aufbereitet und über Wasserreservoirs und das Wasserversorgungsnetz zu den Verbrauchern geleitet wird (<https://www.vodarenstvi.cz/svet-vody/>).

In der Region Karlovy Vary wird ein großer Teil der Bevölkerung mit Oberflächenwasser aus den Stauseen Horka, Krásná Lípa, Stanovice, Teplá und Žlutice versorgt. Ein Teil der Bevölkerung ist an die Oberflächenwasserquellen des Stříbrný-Bachs (Stříbrná), der Bystřina (Rotava) und des Vlčí-Bachs (Nová Role) angeschlossen. Grundwasser wird in Nebanice, Aš, Skalka bei Hazlov, Luby, Hroznětín, Nejdeč, Jáchymov, Plavno, Boží Dar, Ryžovna, Hřebečná, Horní Blatná und vielen anderen Orten gesammelt. Alle Quellen der öffentlichen Versorgung sind durch Hygieneschutzzonen (Wasserschutzgebiete) geschützt, deren Lage und Ausdehnung z. B. in der interaktiven Karte unter <https://heis.vuv.cz/data/webmap> dargestellt sind.

2.1 Oberflächenwasser

Oberflächenwasser ist Wasser aus allen Oberflächenwasserquellen. Oberflächenwasser wird unterteilt in fließendes, stehendes und in Stauseen gespeichertes Wasser. Die Nutzung von Oberflächenwasser für bestimmte Zwecke wird in der Regel durch seine Qualität begrenzt. Dementsprechend werden auch die Entnahmeeinrichtungen in Stauseen, Wehranlagen und Fließgewässern unterschieden (VUT 2015).

Anlagen zur Entnahme von Oberflächenwasser aus Stauseen und Wehranlagen

Stauanlagen zum Sammeln von Oberflächenwasser aus Stauseen können allein im Staubereich stehen oder baulich mit dem Dammkörper verbunden sein (VUT 2015). Die Wasserentnahmestellen sind stufenweise in unterschiedlichen Höhen angeordnet, so dass die Tiefe der Entnahmestellen in Abhängigkeit von der Wasserqualität (z. B. je nach Jahreszeit) reguliert werden kann.

Entnahme in Fließgewässern

Die Wahl einer geeigneten Anlage für die Entnahme von fließendem Wasser wird durch das Regime der Wasserquelle, die Wahl der Entnahmestelle, die Art des Sumpfes und dessen Schutz gegen Verschlammung, Gefrieren und Wasserschlag bestimmt.

Uferschächte werden in Bächen mit stabilen Ufern gebaut, die den Bau einer Anlage mit garantierter Entnahme auch bei geringem Wasserstand im Bach ermöglichen. Dies eignet sich besonders für Mittel- und Unterläufe von Bächen an Stellen mit geringer Sedimentanreicherung (VUT 2015).

Auffangbecken im Gerinnebett werden nur in Ausnahmefällen an Bächen mit Ufercharakter vorgeschlagen. Sie können nicht in Bereichen mit geringer Wassergeschwindigkeit installiert werden, in denen sich Schwebstoffe absetzen können. Das Einlaufbauwerk darf das

Strömungsprofil des Fließgewässers nicht verringern und auch sonst keine Auswirkungen auf andere Eigenschaften haben (insbesondere hydraulische Eigenschaften, z. B. Wasserhebungen usw., VUT 2015).

Oberhalb der Sohle liegende Entnahmestellen können in breiteren Bächen mit instabilen Ufern, mit unzureichender Wassertiefe an den Ufern aufgrund häufiger Wasserstandsschwankungen oder wenn es aufgrund großer Mengen feiner Sedimente nicht möglich ist, Wasser im Bachbett zu sammeln, eingerichtet werden (VUT 2015).

2.2 Grundwasser

Nach https://cs.wikipedia.org/wiki/Podzemní_voda ist Grundwasser das, was unter der Erdoberfläche liegt, insbesondere in den Poren zwischen den Boden- und Sedimentpartikeln und dort, wo die Kontinuität des Gesteins unterbrochen ist. Aus hydrogeologischer Sicht ist es das Wasser unterhalb der Erdoberfläche in der gesättigten Zone, wo es alle Hohlräume ausfüllt und durch den oberen und unteren Horizont begrenzt wird. Andere Gewässer unterhalb der Oberfläche, die dieser Definition nicht entsprechen, sind unterirdische Gewässer (Bodenfeuchtigkeit, Wasser in der ungesättigten Zone, Wasser in anderen Phasen, Kapillarwasser). Das Grundwasser macht etwa 20 % der weltweit verfügbaren Süßwasserreserven aus. Übersteigt der Gehalt an gelösten Mineralien oder Gasen einen bestimmten Grenzwert, wird dieses Wasser als Mineralwasser bezeichnet.

Für die Planung, den Bau und den Betrieb von neuen oder rekonstruierten Einläufen und Einläufen für flaches Grundwasser gilt die CSN 75 5115. Grundwassergewinnungsanlagen werden im Allgemeinen in vertikale (Rohr- und Schachtbrunnen), horizontale (Fassungsräben, Stollen, Horizontalbohrungen) und oberirdische (Quellschächte) unterteilt.

Vertikale Fassungsobjekte

Schachtbrunnen haben ein relativ großes Volumen und werden daher auch zur Wasserspeicherung genutzt. Die Tiefe der Schachtbrunnen beträgt in der Regel nicht mehr als 15 m (VUT 2015). Das Wasser fließt durch Ein- bzw. Auslauföffnungen in der Ummantelung in den Brunnen. Brunnen können gegraben oder gebohrt werden.

Röhrenbrunnen sind nur für kleine Wasserentnahmen (bis etwa 0,5 l/s) geeignet. Sie bestehen aus Stahlrohren mit einem Durchmesser von 30-80 mm und einer Länge von 1-2 m, die mit einem Gewinde verbunden sind. Brunnen dieser Art können bis zu 50 m tief sein.

Bohrbrunnen ermöglichen die Wasserentnahme aus einer Tiefe von bis zu 100 m. Sie können in fast allen geologischen Formationen mit handelsüblichen Maschinen gebaut werden. Das Hauptstrukturelement ist eine Stahl- oder Kunststoffverrohrung, die im entsprechenden wasserführenden Tiefenintervall perforiert und durch eine Kiesschüttung vom umgebenden Gestein getrennt ist. Es wird unterschieden (z. B. Kučera 2006) zwischen Bohrlöchern mit kleinem Profil (bis 200 mm), mittlerem Profil (200 bis 500 mm) und großem Profil (über 500 mm).

Sogenannte Radialbrunnen kombinieren Elemente von Vertikal- und Horizontalbrunnen. Das vertikale Element ist ein Schachtbrunnen, an den die horizontalen Sammelkanäle angeschlossen sind. Diese Drainagen werden mit hydraulischen Pressen direkt vom Brunnen aus in die Seitenwände gedrückt. Die Abflüsse bestehen in der Regel aus perforiertem Stahlrohr.

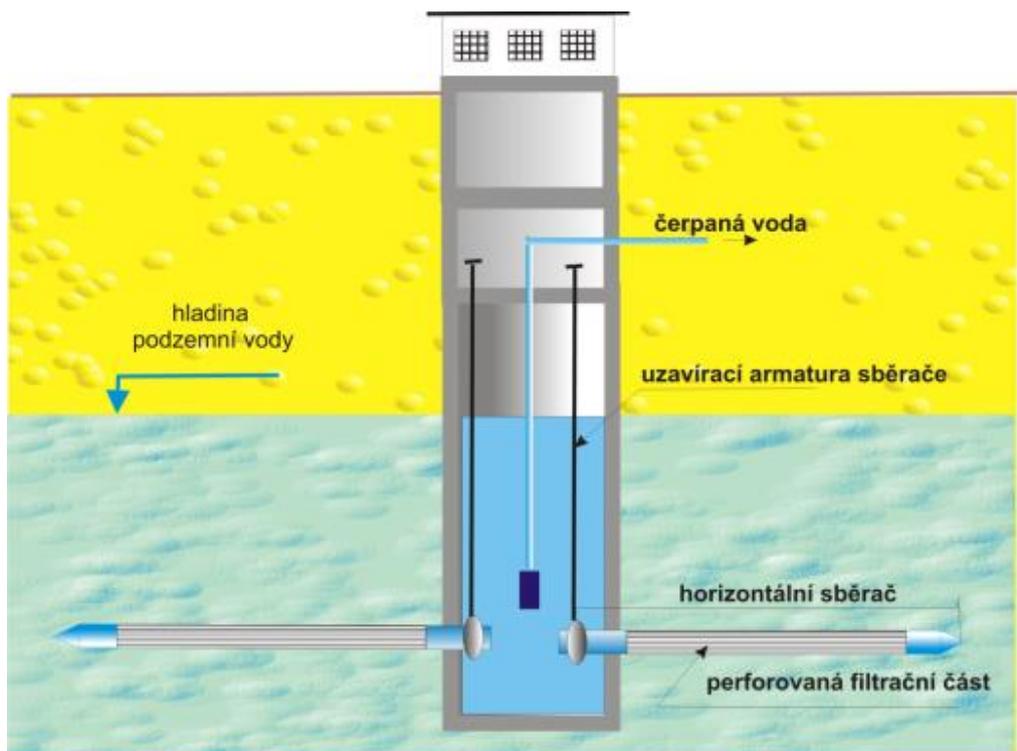


Abb. 5. Brunnen mit horizontalen Sammelkanälen (Pastuszek 2009, <https://cs.wikipedia.org/wiki/Studna>).

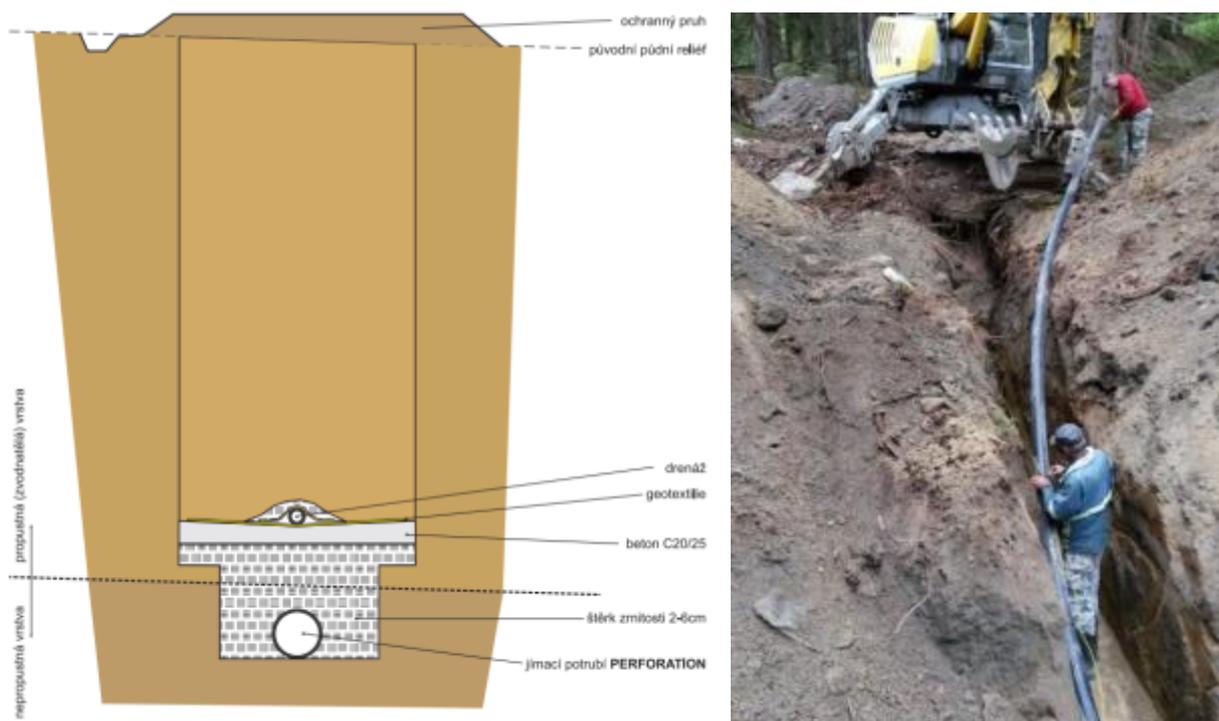


Abb. 6. Links: Querschnitt durch den Fassungsgraben. Rechts: Der Bau eines Fassungsgrabens (www.pospisil-ro.cz).

3 Qanate

Eine besondere Art von Fassungsstollen sind Qanate (Schreibweise auch Kanat). Ein Qanat ist ein Wassermanagementsystem, das der zuverlässigen Wasserversorgung von menschlichen Siedlungen oder der Bewässerung in Halbwüsten und Trockengebieten dient. Die ältesten Qanate stammen nachweislich aus Persien und sind mehrere Tausend Jahre alt. Es ist sehr wahrscheinlich, dass diese ausgeklügelte Technik das Geheimnis der alten Zivilisation in diesem trockenen Land ist. Qanate, die sich über Dutzende von Kilometern erstreckten, ermöglichten die Wasserversorgung von Siedlungen und landwirtschaftlichen Gebieten weitab von den Berghängen. Noch heute stammt der größte Teil des im Iran zur Bewässerung und als Trinkwasser genutzten Wassers aus diesen Bauwerken, deren Zahl auf vierzig- bis fünfzigtausend geschätzt wird (Klaubert 1967, Beaumont et al. 1989).

Die Basis eines Qanats ist ein subhorizontaler Stollen. Dieser dringt in den Grundwasserleiter ein, nimmt das Wasser auf und leitet es durch die Schwerkraft zum Stollenauslass. Der Stollen hat ein sehr geringes Gefälle (1 m auf 1.500 m bis 1 m auf 1.000 m), so dass das Wasser mit einer sehr geringen Geschwindigkeit fließt und die Auskleidung des Kanals nicht erodiert. Der Ansaugbereich befindet sich häufig in Schwemmkegeln, wo sowohl eine mächtige Schicht durchlässiger Sedimente als auch ein hoher Grundwasserspiegel vorhanden sind (<https://czwiki.cz/Lexikon/Kanát>). Die typische Höhe des Stollens beträgt 1,5 m, die Breite 1 m. Am Beginn des Qanats befindet sich ein sogenannter Mutterbrunnen, der üblich 30-100 m tief ist und Wasser in den Qanat einspeist (das Schema aus Wikipedia in Abb. 7 ist nicht ganz korrekt). Qanatabwärts werden von der Oberfläche aus vertikale Schächte in den Wassertunnel getieft, in der Regel in Abständen von 20-30 m, so dass von oben betrachtet der Eindruck einer langen, geraden Reihe von Löchern im Boden entsteht. Die Schächte dienen dem Erdtransport während der Bauphase und der Belüftung des Tunnels, später dienen sie als Zugang für die Wartung des Tunnels. Die Qanate können eine Länge bis zu 70 km erreichen, normalerweise sind sie 9-16 km lang.

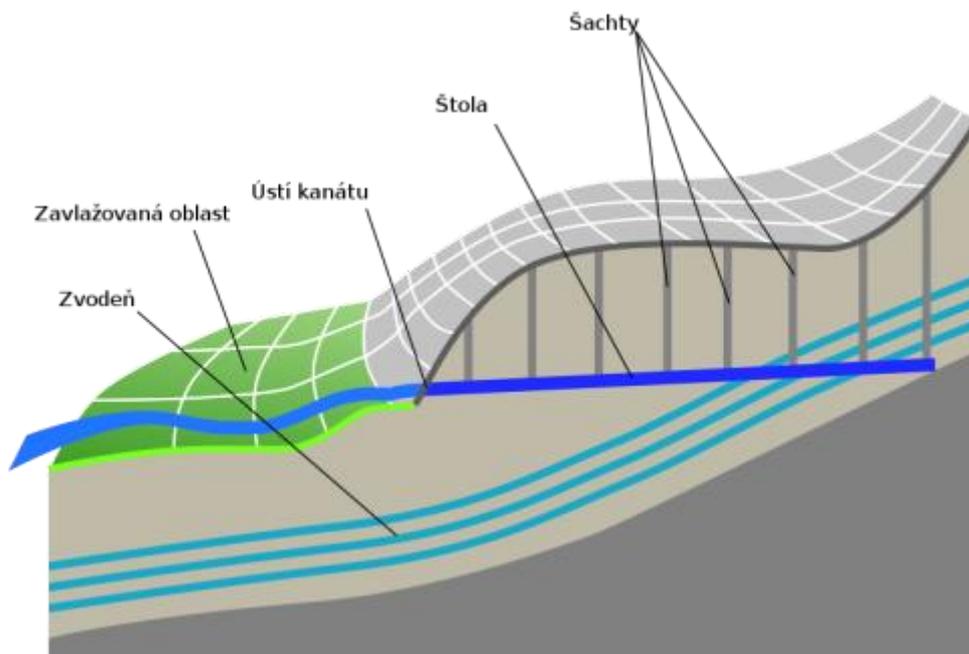


Abb. 7. Schematische Darstellung des Qanats (<https://czwiki.cz/Obrázek/Soubor:Qanat-3-CZ.svg>).



Abb. 8. Qanat-Linien in der Oase Turpan im Nordwesten Chinas (<https://www.cleanrivertrust.co.uk/qanat/>)

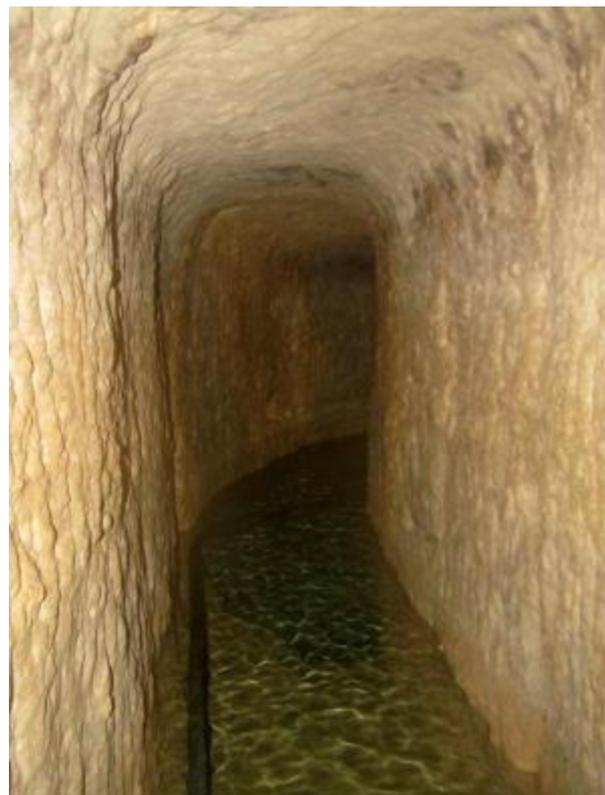
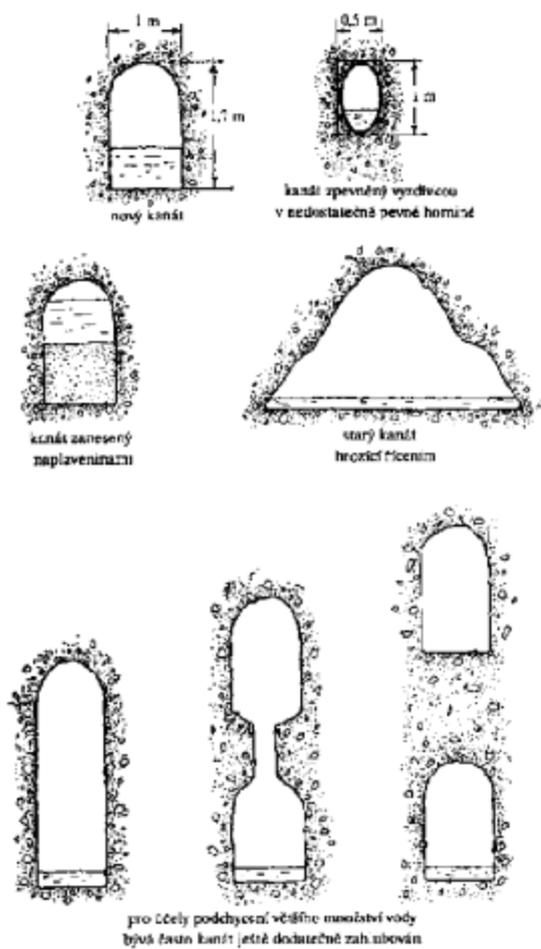


Abb. 9. Links: Querprofile durch den Qanat (Bičík 1971). Rechts: Tunnel des Qanats bei Isfahan, Iran (<https://www.cleanrivertrust.co.uk/qanat/>).

Qanate ermöglichen, große Wassermengen an Orte zu bringen, die tiefer liegen als die Wasserquelle, ohne dass das Wasser gepumpt werden muss. Viele von ihnen, die in der Antike gebaut wurden, sind heute noch in Betrieb. Sie benötigen keinen elektrischen Strom für die eigene Wasserversorgung, sind aber aufwendig zu warten. Dies hat vielerorts dazu geführt, dass sie durch Wasser ersetzt wurden, das aus Brunnen vor Ort gepumpt wird. Durch das Abpumpen sinkt der Grundwasserspiegel und die Qanate trocknen aus. Dieses Schicksal ereilte schon viele, zum Beispiel in Syrien.

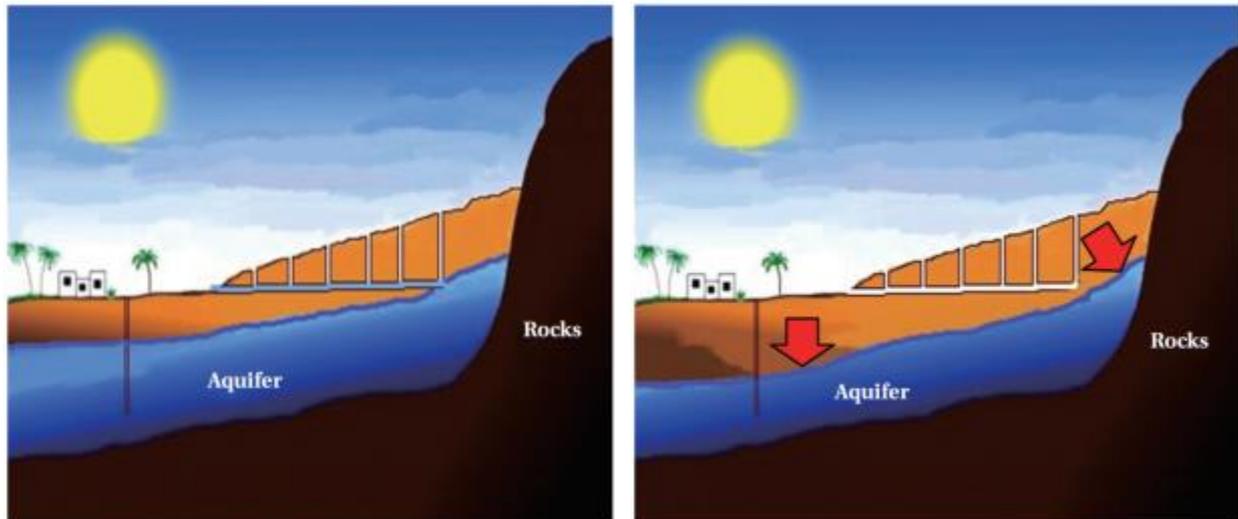


Abb. 10. Funktionsverlust des Qanats durch ein Absinken des Grundwasserspiegels (Taghavi-Jeloudar et al. 2013).

Das aus den Qanaten fließende Wasser kann in unterirdischen Zisternen zwischengespeichert werden. Windtürme, *badgire* genannt, tragen dazu bei, die Temperatur relativ niedrig zu halten. Diese werden seit mehr als 1000 Jahren zur Klimatisierung von Wohnungen verwendet, wobei der Luftstrom hilft, die Sommerhitze von mehr als 45 °C zu ertragen (Šrácěk 2017). Ein Windturm ist ein schornsteinähnliches Bauwerk mit vier Lüftungsöffnungen, das sich über dem Haus befindet. Wenn ein Lüftungsschacht in Windrichtung geöffnet wird, wird kühle Luft aus einem Qanat unter dem Haus angesaugt. Die Luft aus dem Qanat wird sowohl durch den Kontakt mit den kühleren Wänden des Tunnels und mit Wasser als auch durch die Übertragung latenter Wärme beim Verdampfen des Wassers im Luftstrom abgekühlt. Im trockenen Wüstenklima kann dies zu einer Senkung der Lufttemperatur im Qanat um mehr als 15 °C führen. Die Mischluft bleibt relativ trocken, wodurch der Keller kühl und angenehm befeuchtet wird.

In der Vergangenheit wurden Qanate auch zur Kühlung von Kühlschränken, den so genannten *yakhchal*, verwendet, in denen das im Winter angesammelte Eis während der heißen Jahreszeit aufbewahrt wurde. Das Eis wurde aus den umliegenden Bergen herbeigeschafft, häufiger aber wurde es vor Ort hergestellt. Zu diesem Zweck wurde in Ost-West-Richtung eine Mauer errichtet, an deren Nordseite im Winter Wasser aus dem Qanat eingeleitet wurde. Im Schatten gefror das Wasser schneller und das angesammelte Eis wurde im *yakhchal* abgelagert. Ein großer unterirdischer Raum mit dicken isolierten Wänden war mit dem Qanat verbunden und wurde während des Jahres durch Windfänger oder Windtürme gekühlt. Diese Technik wurde in Persien bereits vor 400 v. Chr. beherrscht.

Die Wasserversorgung aus den Qanaten hatte großen Einfluss auf die Siedlungsstruktur. Die wohlhabenderen und einflussreicheren Siedler ließen sich qanataufwärts nieder, wo das

Wasser sauberer und kühler ist und nicht von Wasserknappheit bedroht ist (<https://czwiki.cz/Lexikon/Kanát>).

Die Qanate wurden auf landwirtschaftlichen Flächen außerhalb der besiedelten Gebiete gebaut, aber mit dem Wachstum der Städte in der Neuzeit werden sie zunehmend überbaut. Vergessene und nicht gewartete Gänge unter Gebäuden können einbrechen, insbesondere in Verbindung mit Erdbeben. Sie verursachen Komplikationen beim Bau von unterirdischen Bauwerken und können dazu führen, dass Abwasser, das das Grundwasser verunreinigt, durch sie hindurchsickert. Trotzdem bleiben die Qanate die wichtigste Wasserquelle für die lokale Bevölkerung (Šráček 2017). Es gibt Vorschläge, sie mit modernen Technologien zu rekonstruieren (Geomembranen, Geotextilien usw.; z. B. Taghavi-Jeloudar et al. 2013).

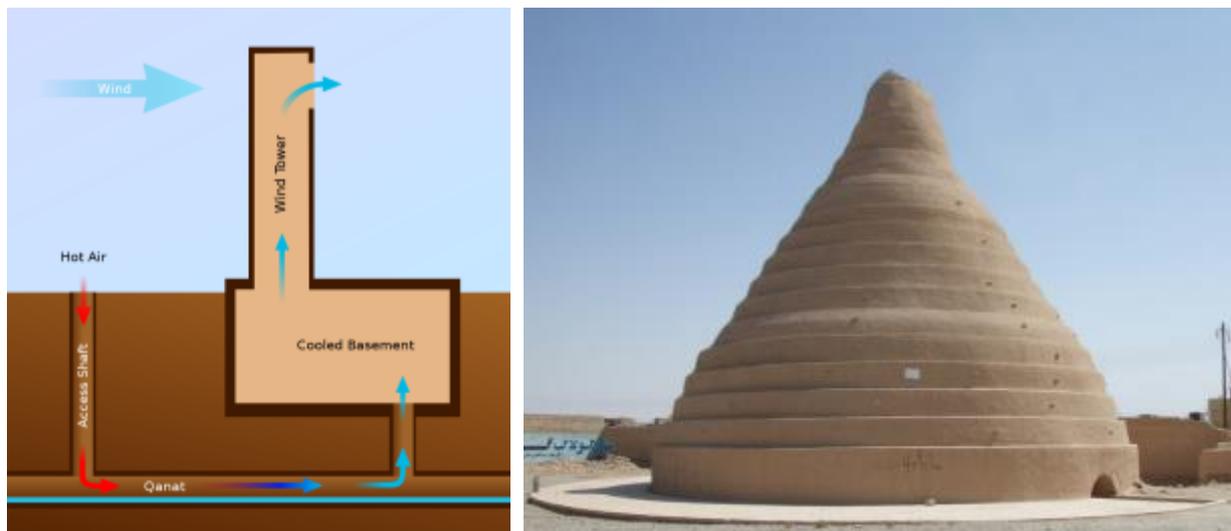


Abb. 11. Links: Schema des Windturms oberhalb des Qanats. Rechts: Yakhchal in der Provinz Yazd (<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8659258>).

Das Qanatsystem verbreitete sich zunächst in den Ländern, die zum persischen Reich gehörten oder mit diesem kulturell verbunden waren, und dann weiter in der Welt. Qanate sind aus Mesopotamien, d.h. dem heutigen Irak und Syrien, Pakistan und Afghanistan, Westchina, Südrussland, den jungen Golfstaaten, Nordafrika und Südeuropa bekannt (Iransafar 2019). Ähnliche Wasserstrukturen gibt es auch in Mexiko, Chile und Peru. Es gibt viele Namen für sie, wie z. B. *qanat* (Persisch), *qanat romani* (Jordanien, Syrien), *khettara* (Marokko), *galería* (Spanien), *falaj* (Vereinigte Arabische Emirate und Oman), *kahn* (Belutschistan), *foggara/fughara* (Nordafrika) und *karez/kariz* (z. B. Afghanistan, Pakistan, Armenien und China).

Die Theorie der Ausbreitung dieser Technologie von einem einzigen Zentrum in Persien aus wird durch die Existenz viel älterer Qanate in Oman und den Vereinigten Arabischen Emiraten widerlegt. Es ist möglich, dass ähnliche Praktiken unabhängig voneinander in verschiedenen Regionen eingeführt wurden (z. B. Angelakis et al. 2017).

3.1 Iran und Südwestasien

Die Hauptstadt des Qanats ist Yazd im Zentraliran, wo es auch ein Wassermuseum gibt (Šrácěk 2017). Laut *Iransafar* (2019) gibt es im Iran etwa 36.300 bekannte Qanate. Im Jahr 2014 wurden in der Nähe des Seimareh-Staudamms (Westiran) Überreste eines Qanats aus dem dritten Jahrtausend v. Chr. gefunden. Im Jahr 2003 wurde nach dem Erdbeben von Bam ein Aquädukt entdeckt, das aus dem Ende der Achämenidenzeit (6. bis 4. v. Chr.) stammt.

Der griechische Historiker Polybios (2. Jh. v. Chr.) berichtet im Zusammenhang mit den Qanaten, dass die Perser auf geheimnisvolle Weise Wasser aus den Tiefen der Erde an die Oberfläche brachten. Der römische Architekt Vitruv (80/70 - ≈ 15 v. Chr.) beschrieb einige technische Details dieses Phänomens in seinen zehn Büchern über Architektur.

Die Quasabeh (Ghasabeh)-Kanäle in Gonabad in der Provinz Khorasan Razavi im Nordosten des Irans, die zu den ältesten und größten der Welt gehören, stammen ebenfalls aus den Jahren 700 und 500 v. Chr. Im Jahr 2016 wurde die Stätte zusammen mit anderen iranischen Qanaten offiziell in die Liste des UNESCO-Welterbes aufgenommen (https://en.wikipedia.org/wiki/Qanats_of_Ghasabeh).

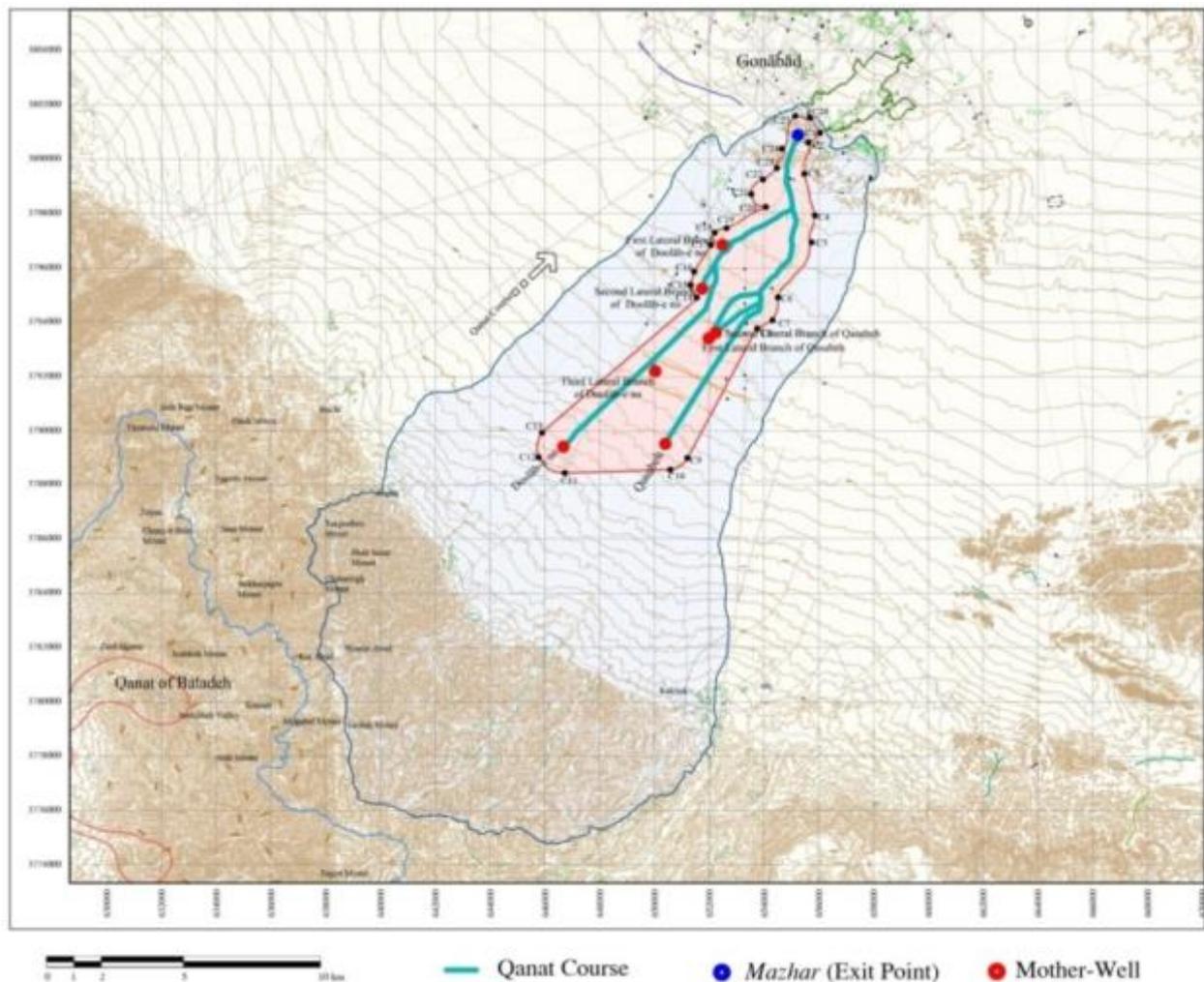


Abb. 12. Schema der Quasabeh (Ghasabeh)-Qanate in Gonabad, Provinz Khorasan Razavi im Nordosten Irans (https://whc.unesco.org/en/list/1506/multiple=1&unique_number=2096).

Tabelle 1. *Iranische Qanate auf der UNESCO-Welterbeliste*
 (<https://www.persiaadvisor.travel/about-persia/persian-qanat/>).

Benennung	Provinz	Bemerkung
Qasabeh (Ghasabe)	Razavi- Chorāsān	Das System besteht aus mehr als 400 Schächten, wobei der Hauptschacht 300 Meter tief ist.
Baladeh	Süd- Chorāsān	Der Qanat war ausschlaggebend für die Gründung und Entwicklung der Stadt Ferdows und der umliegenden abhängigen Dörfer. Er verfügt über 15 Schächte und vier Dauerbrunnen.
Zarch	Yazd	Das längste Qanatsystem ist 100 km lang, sein Hauptbrunnen ist 90 m tief und hat mehr als 2.000 Brunnenschächte.
Hassan Abad-e Moshir (Hassanabad Moshir)	Yazd	Das Qanatsystem wurde im 14. Jh. n. Chr. geschaffen; es hat einen hohen Ertrag bei geringer Tiefe. Das Wasser ist von hoher Qualität und frei von Salzen und Karbonaten.
Bam (Ghasem Abad & Akbar Abad)	Kerman	Zwei nahe beieinander liegende Qanatlinien liefern genügend Wasser für die Bewässerung der Felder vieler Dörfer in Kerman. Sie sind relativ neu, da sie erst 100 Jahre alt sind.
Moon	Isfahān	Ein etwa 800 Jahre alter Qanat mit zwei übereinander liegenden, getrennten Grundwasserleitern.
Vazvan (Wezwan)	Esfahān	Der Vazvan-Qanat ist 1.800 m lang. Auf seinen Galerien sind drei unterirdische Dämme gebaut. Ein einzigartiges technisches Merkmal ist die Möglichkeit, den Auslassschacht im Winter zu schließen, um Wasser für die Frühjahrsbewässerung von landwirtschaftlichen Flächen zu sparen.
Mozd Abad (Mazdabad)	Esfahān	Der zweitälteste Qanat im Iran ist mehr als 2.000 Jahre alt.
Ebrahim Abad	Markazi	Der Qanat aus dem 12. Jh. enthält 311 Schächte; der Mutterbrunnen ist 53 Meter tief.
Gowhar-riz (Goharriz)	Kerman	Der voll funktionsfähige Qanat, der aus insgesamt 3.556 m Kanälen besteht, bewässert mehr als 330 Hektar trockenes Land in der Provinz Kerman.

Vor dem Hintergrund des fortschreitenden Klimawandels nehmen die jährlichen Niederschläge ab und häufen sich zudem in einem kürzeren Zeitraum. Dies hat zur Folge, dass der Grundwasserspiegel sinkt und einige Qanate austrocknen. Der Einfluss des Klimas wird häufig durch die intensive Förderung von Wasser aus Bohrbrunnen in ihrer Nähe noch verstärkt. So ist die Zahl der funktionierenden Qanate im Iran schrittweise von 20.000 im Jahr 1988 auf 18.000 im Jahr 2010 zurückgegangen (Šrácěk 2017).

Auch in der Neuzeit werden im Iran Qanate gebaut (Wulff 1968). So berichtet English (1968) von zwei neuen Qanaten in den Dörfern Javadieh und Hujatabad südlich von Kerman, Iran. Der Hujatabad-Qanat ist einen Kilometer lang und hat einen 45 Meter tiefen Mutterbrunnen, dessen Bau aufgrund dreier Eigentümerwechsel 27 Jahre dauerte. Der Bau des Javadieh-Qanats begann 1941. Ein Team von Gräbern arbeitete 17 Jahre lang täglich daran, bevor das Wasser an die Oberfläche kam. Im Jahr 1958 wurde der Ertrag reduziert und die Arbeiten bis zu einer Länge von 3 km fortgesetzt. Der Qanat hat am Ende zwei Abzweigungen mit 50 und 55 Meter tiefen Mutterbrunnen. Aufgrund des lockeren Sandes musste der größte Teil des Tunnels mit Keramik ausgekleidet werden. Die Kosten betragen zum Zeitpunkt des Baus 33.000 US-Dollar.



Abb. 13. Die Gonabad-Qanate gehören zum UNESCO-Weltkulturerbe (https://en.wikipedia.org/wiki/Qanats_of_Ghasabeh).



Abb. 14. Steinbefestigung der Zibad-Qanat in Gonabad (<https://en.wikipedia.org/wiki/Gonabad>).

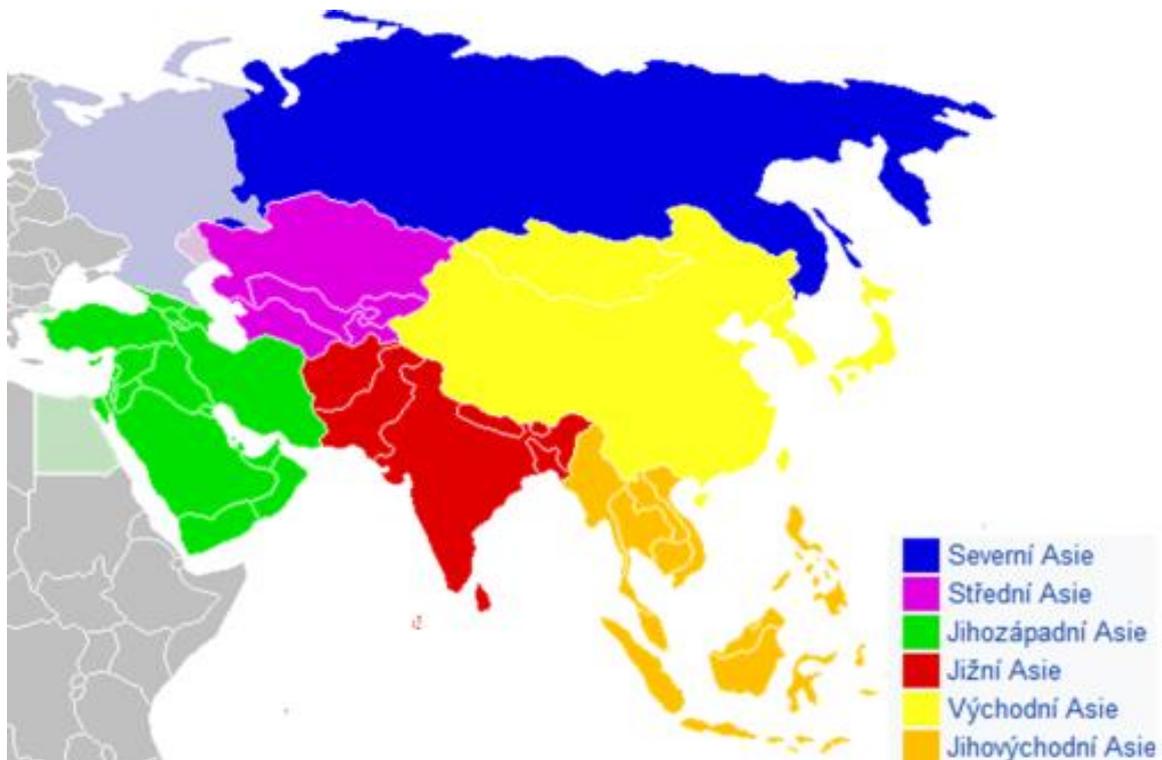


Abb. 15. Die Regionen Asiens (https://cs.wikipedia.org/wiki/Asie#Regiony_a_státy).

Im heutigen Jordanien werden die Qanate nach Lightfoot (1997) als *römische Kanäle* oder *qanat romani* (*kaneh romani*) im nördlichen und *sarab* im südlichen Teil des Landes bezeichnet. Der Begriff „römisch“ wird hier üblicherweise für antike Bauwerke verwendet und sollte im Sinne von vorislamisch und nicht unbedingt römisch interpretiert werden. Die Qanatbewässerung wurde erstmals um 700-600 v. Chr. im armenisch-persischen Raum eingeführt und erst später Teil der antiken Wissenschaft und Technologie. Archäologische Funde zeigen, dass bereits zur Zeit der persischen Herrschaft im Heiligen Land (537-332 v. Chr.) Qanate gebaut wurden und erst später die Römer begannen, sie zu nutzen. Die meisten historischen Bewässerungssysteme in Jordanien stammen jedoch wahrscheinlich aus der Römerzeit. Die Römer (64 v. Chr. - 330 n. Chr.) und ihre Nachfolger im Oströmischen Reich, die Byzantiner (330-630 n. Chr.), statteten Jordanien (und Syrien) mit zahlreichen Aquädukten und Brunnen aus; sie perfektionierten die Bewässerungstechniken in der Region und dehnten die Anbauflächen aus. Während der römischen Herrschaft erlebte die Levante eine beispiellose Blütezeit. Der Aquädukt von Gadara (Qanat Fir'aun) im Norden Jordaniens ist mit einer Länge von 94 km wahrscheinlich der längste durchgehende Qanat der antiken Welt. Sein Bau begann vermutlich nach dem Besuch von Kaiser Hadrian in den Jahren 129-130 n. Chr. Er folgte teilweise dem Verlauf eines früheren hellenistischen Aquädukts, wurde jedoch nie vollständig fertiggestellt und nur in Teilen in Betrieb genommen (<http://www.dekapolis-aquaedukt.de/de>).

Angelakis et al. (2017) berichten aus Israel über eine Reihe historischer Wassersysteme, darunter auch Wasserstollen, die dazu dienten, Grundwasser zu menschlichen Siedlungen zu bringen. Dabei handelt es sich vor allem um die so genannten Quelltunnel (hebräisch *niqba*), die in der Antike subhorizontal in den Grundwasserleitern angelegt wurden. Diese Stollen unterscheiden sich von den Qanaten.

Die arabische Region ist eine der trockensten Gegenden der Welt und zeichnet sich durch geringe Niederschläge und sehr hohe Temperaturen aus. Dennoch wird in diesen Regionen seit jeher Landwirtschaft betrieben, und zwar dank der jahrhundertealten Praxis, unterirdische Wassertunnel zu bauen, die die Grundwasserleiter in den angrenzenden Bergregionen nutzen und das Grundwasser in den halbtrockenen und trockenen Tälern und Ebenen durch Schwerkraft an die Oberfläche leiten (Lightfoot 2000).

In Syrien sind Qanate (*qanat romani*) römischen und byzantinischen Ursprungs fast im gesamten Gebiet bekannt. Die meisten von ihnen sind inzwischen aufgegeben worden, vor allem wegen des Absinkens des Grundwasserspiegels infolge der umfangreichen Installation von Pumpen in Brunnen (<https://www.cleanriverstrust.co.uk/qanat/>). Die meisten der verbleibenden Qanate sind nicht länger als 3 bis 5 km. Nach Angelakis et al. (2017) gibt es in Syrien drei Haupttypen von Qanaten: (1) **Quellqanate**, die auf Brunnen beruhen, die in festem Kalkstein in der Nähe der Gebirgsregionen im Westen des Landes gegraben wurden, (2) **Infiltrationsqanate**, die in den Schwemmlandebenen (hauptsächlich in den trockenen zentralen und östlichen Regionen) gegraben wurden, und (3) **Flussqanate** in den Schwemmlandebenen der wichtigsten Flüsse (z. B. Euphrat und Barada).

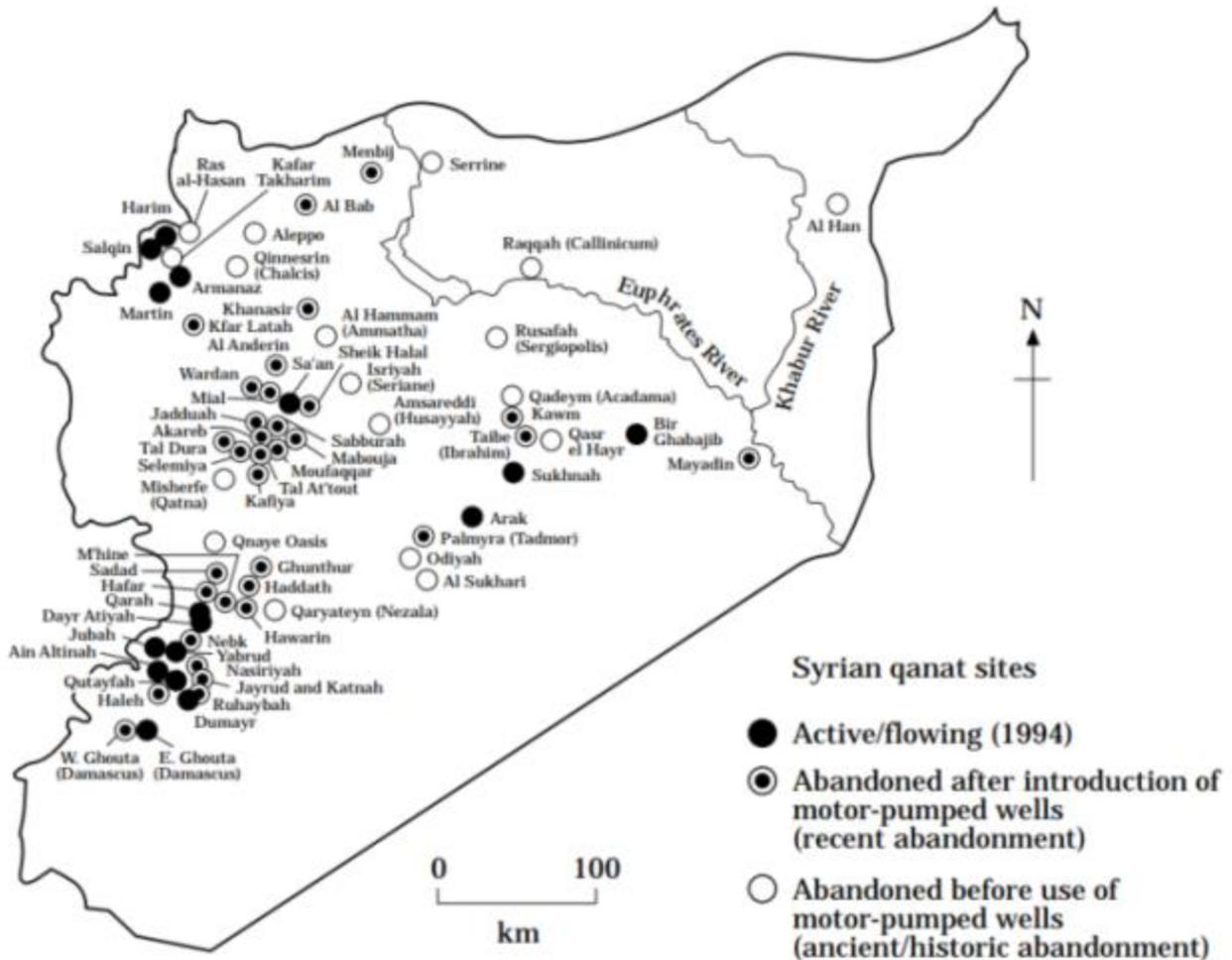


Abb. 16. Qanate in Syrien (Lightfoot 1996).

Im Oman wurden bereits in der Eisenzeit Bewässerungssysteme (*Faladsch*, Falaj, Pl. *Aflaj*) nach dem Qanatprinzip gebaut. Die Omanis unterscheiden drei Formen (Al-Ghafri et al. 2003; <https://de.wikipedia.org/wiki/Faladsch>):

- die *Aini-Afladsch*, die direkt von den Quellen gespeist werden
- die *Ghaili-Afladsch*, die ihr Wasser aus einem Wadi erhalten, und es in meist offenen Kanälen zum Bestimmungsort leiten
- die *Iddi-Afladsch* (*daudi*, *dawoodi*), die ihren Anfang als Grundwasser in unterirdischen Brunnen nehmen und dieses in bis zu 20 m tiefen Tunneln mit minimalem Gefälle nach kilometerlangen Wegen ans Tageslicht leiten. Beim Bau werden zunächst durch Probebohrungen Wasserläufe festgestellt, dann Schächte gegraben, die später verbunden werden, um das Wasser bis zum Ackerland zu führen. Die Länge der unterirdischen Anlagen kann bis zu zehn Kilometer betragen. Dadurch kann die regelmäßige Zufuhr von Frischwasser bei geringen Verdunstungsverlusten gewährleistet werden. – Im Iran werden diese unterirdischen Kanäle als Qanat bezeichnet.

Nach Angaben der UNESCO sind im Oman heute noch etwa 3.000 *falajs* in Gebrauch. Das *Afladsch-Bewässerungssystem* gehört seit 2006 zum UNESCO-Weltkulturerbe. Es handelt sich um fünf Bewässerungssysteme, die sich an verschiedenen Orten im Oman befinden (https://cs.wikipedia.org/wiki/Zavlažovací_systémy_Aflaj). In vier Fällen handelt es sich um

unterirdische Aquädukte vom Typ *daudi* und in einem Fall vom Typ *aini*. Die *falajs* Daris und Al-Khatmeen sind mit einem Abfluss von über 2.000 Liter/Sekunde die wichtigsten Kanäle im Oman (Angelakis et al. 2017).

In den Vereinigten Arabischen Emiraten sind in den Gebieten Al Ain, Bidaa Bint Saud und Al Madam *Falaj*-Systeme bekannt, die wahrscheinlich auf die Eisenzeit zurückgehen. Angelakis et al. (2017) berichten von 40 dokumentierten Qanaten in den VAE mit einer Länge von 0,5 - 10 km, von denen noch acht funktionsfähig sind. Ähnlich wie im Oman werden sie nach geografischer Lage, geologischer Beschaffenheit und Wasserquelle unterschieden: (1) *Falajs*, die mit Regenwasser gespeist werden, deren Ertrag je nach Niederschlagsintensität stark schwankt und die über Wasser von guter Qualität verfügen (*Al Gheli*), (2) *Falajs* mit Wasser aus flachen Grundwasserleitern und ganzjährig konstantem Durchfluss (*Al Daudi*) und (3) *Falajs*, die von Quellen oder tiefen artesischen Grundwasserleitern in Kalksteinen oder Ophioliten (*Al Hadouri*, *Al Aini*) gespeist werden.

Weitere Qanate auf der Arabischen Halbinsel konzentrieren sich auf zwei Hauptzonen. Die eine verläuft quer über die Halbinsel, die andere entlang ihrer Südküste (Abb. 17). Auch hier werden die Qanate heute durch Tiefbrunnen mit Pumpen ersetzt (Abb. 18).

In Irakisch-Kurdistan waren im Jahr 2009 nur 116 von 683 *Karez*-Systemen aktiv. Die Hauptgründe für den Niedergang dieser Systeme waren mangelnde Wartung, übermäßiges Abpumpen aus Brunnen im Quellgebiet und Trockenheit. Berichten zufolge hat die Wasserknappheit seit 2005 mehr als 100.000 Menschen, die von der Wasserversorgung aus Qanaten abhängig sind, gezwungen, ihre Häuser zu verlassen (<https://www.cleanriverstrust.co.uk/qanat/>). Laut einer UN-Studie hat ein *Karez* das Potenzial, fast 9.000 Menschen mit Wasser zu versorgen und über 200 Hektar Ackerland zu bewässern (Lightfoot 2009). Die meisten *Karez* finden sich in den Gouvernements Suleimaniya (84 %) und Erbil (13 %).

In Armenien sind Qanate zum Beispiel in dem Dorf Shvanidzor in der südlichen Provinz Syunik, die an den Iran grenzt, erhalten geblieben. Qanate werden auf Armenisch *karez* (*kahrez*) genannt. Es gibt fünf *Karez* in Shvanidzor. Vier von ihnen wurden im 12. - 14. Jh. erbaut, das fünfte stammt aus dem Jahr 2005. Im Sommer erreicht die Wassermenge ihr Minimum, was zu einer kritischen Situation im Wasserversorgungsnetz führt. Dennoch sind die *Kareze* die Hauptquelle für Trinkwasser und Wasser für die Bewässerung des Dorfes (<https://en.wikipedia.org/wiki/Shvanidzor>).

Vor vielen Jahrhunderten gab es auf dem Gebiet von Aserbaidshan zahlreiche *Karizas*. Archäologische Funde deuten darauf hin, dass die Bewohner bereits lange vor dem 9. Jahrhundert diese Systeme nutzten, um Trinkwasser und Bewässerungswasser zu ihren Siedlungen zu bringen. Traditionell wurden die *Karizas* von einer Gruppe von Maurern, den *Kankani*, von Hand gebaut und instand gehalten. Dieser Beruf wurde vom Vater an den Sohn weitergegeben. Es wird geschätzt, dass es bis zum 20. Jahrhundert fast 1.500 *Karizas* in Aserbaidshan gab, davon bis zu 400 in der Autonomen Republik Nachitschewan. Sie wurden nach der Einführung von Brunnen mit Motorpumpen in der Sowjetzeit vernachlässigt. Dennoch sind rund 800 von ihnen noch in Betrieb und für das Leben vieler Dörfer nach wie vor von entscheidender Bedeutung (<https://en.wikipedia.org/wiki/Qanat>).

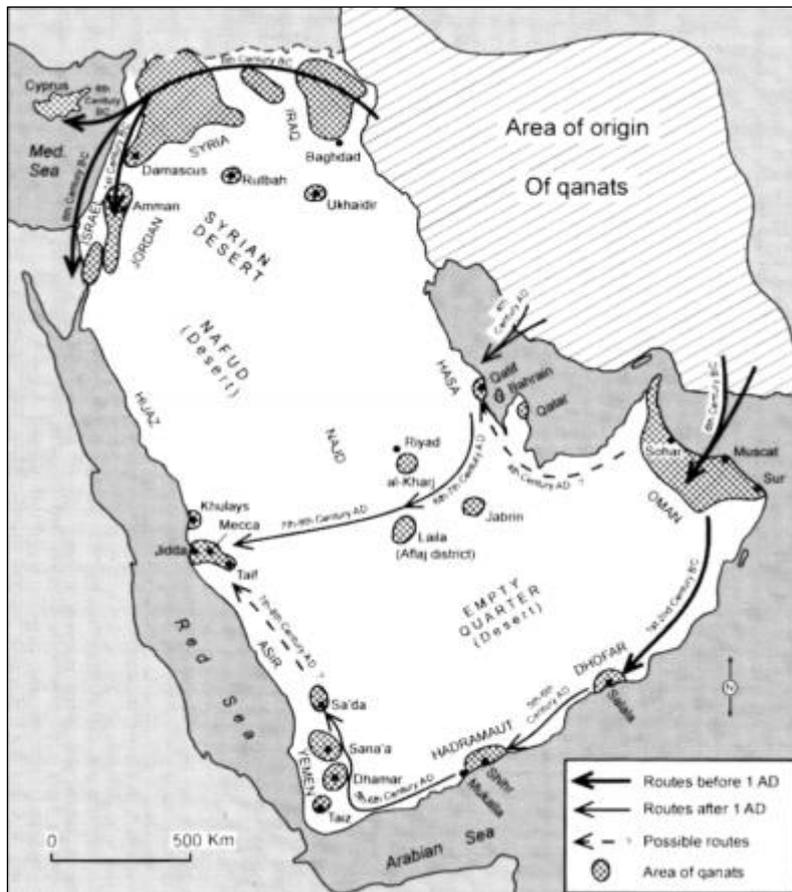


Abb. 17. Qanate auf der Arabischen Halbinsel (Lightfoot 2000).



Abb. 18. Das Abpumpen von Wasser aus Tiefbrunnen für kreisförmige Bewässerungssysteme führt zur Zerstörung alter Qanaten (die Gegend von Layla, im zentralen Teil der Arabischen Halbinsel).

3.2 Mittelasien

Die Siedlungen entlang der Großen Seidenstraße spielten zwischen 200 v. Chr. und 1600 n. Chr. eine Schlüsselrolle für die Entwicklung der Weltzivilisation. Diese Handelsroute, die die Küste des Ostchinesischen Meeres mit Europa verband, führte durch das nördliche Turpan-Becken, das Pamir-Gebirge im Fergana-Tal und Ostturkmenistan. In Wüsten- und Trockengebieten ohne oberirdische Wasserläufe waren unterirdische Systeme die einzige Möglichkeit der Wasserversorgung. Heute sind die Qanatsysteme einzigartige Kulturdenkmäler, deren Geschichte bis in die Antike zurückreicht (Guliyev 2014). Laut Angelakis et al. (2017) sind 200, 235 bzw. mehr als 1.000 *Karizes* aus Südkasachstan, Turkmenistan und Usbekistan bekannt.

3.3 Südasien

In Afghanistan werden Qanate (*karez/kariz* in Paschtunisch) seit der vorislamischen Zeit verwendet. Man schätzt, dass Mitte des 20. Jahrhunderts mehr als 20.000 dieser Wasserwerke in Betrieb waren. Die meisten von ihnen sind weniger als 5 km lang, können aber auch bis zu 16 km erreichen. Das älteste funktionierende *Kariz* in der Provinz Wardak ist über 300 Jahre alt. Es ist 8 km lang und versorgt noch immer fast 3.000 Einwohner mit Wasser. Die Kriege der letzten Jahrzehnte haben viele dieser alten Strukturen zerstört. Wegen der erschwerten Wartung wurde zu gebohrten und gegrabenen Brunnen mit Dieselpumpen übergegangen (Tamuri 2007, <https://en.wikipedia.org/>; Angelakis et al. 2017).

In Pakistan sind die *Karezas* immer noch eine wichtige Wasserquelle für die Bewässerung der trockenen Hochebene von Belutschistan. Schätzungsweise 3.000 dieser Systeme waren hier bis 1970 in Betrieb und versorgten die Siedlungen und die Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen. Mit der Verfügbarkeit von Elektrizität und der Bohrlochtechnologie begannen sie zu schrumpfen. Heute ist weniger als ein Drittel funktionsfähig (Angelakis et al. 2017).

Im Südwesten Indiens, am Fuße der Westghats, wurden Qanat-ähnliche Systeme namens *Suranga* (<https://en.wikipedia.org/wiki/Suranga>) zur Grundwasserversorgung angelegt. Angelakis et al. (2017) nennt vier Haupttypen von *Surangas* (Abb. 19): (1) klassische, in den Hang gegrabene Systeme, (2) Wassertunnel mit Luftschächten, die den persischen Qanaten am ähnlichsten sind (Plateausysteme mit Luftschächten), (3) gegrabene Brunnensysteme, die von Wasserschächten gespeist werden, und (4) Siphonsysteme. Um die Ausbeute zu erhöhen, verzweigen sich die Wassergänge in der Regel am Ende in so genannte *kai* ("Finger", Abb. 20).

Das etwa 2 km lange Qanatsystem zwischen Naubad und Kolar in Bidar (Bundesstaat Karnataka) hatte ursprünglich 21 vertikale Schächte mit rechteckigem Profil, von denen nur noch ein Teil erhalten ist. In der Nähe wurden die Überreste des königlichen Bades von Bagh-e-Hammam entdeckt, das wahrscheinlich aus der Zeit des Bahmani-Sultanats (14.-16. Jh.) stammt. Das Gebäude hat drei Stockwerke mit einer Höhe von je etwa 2 m. Die Bäder wurden durch Terrakotta-Rohre mit Wasser aus Kanälen versorgt (Raghubans 2015).

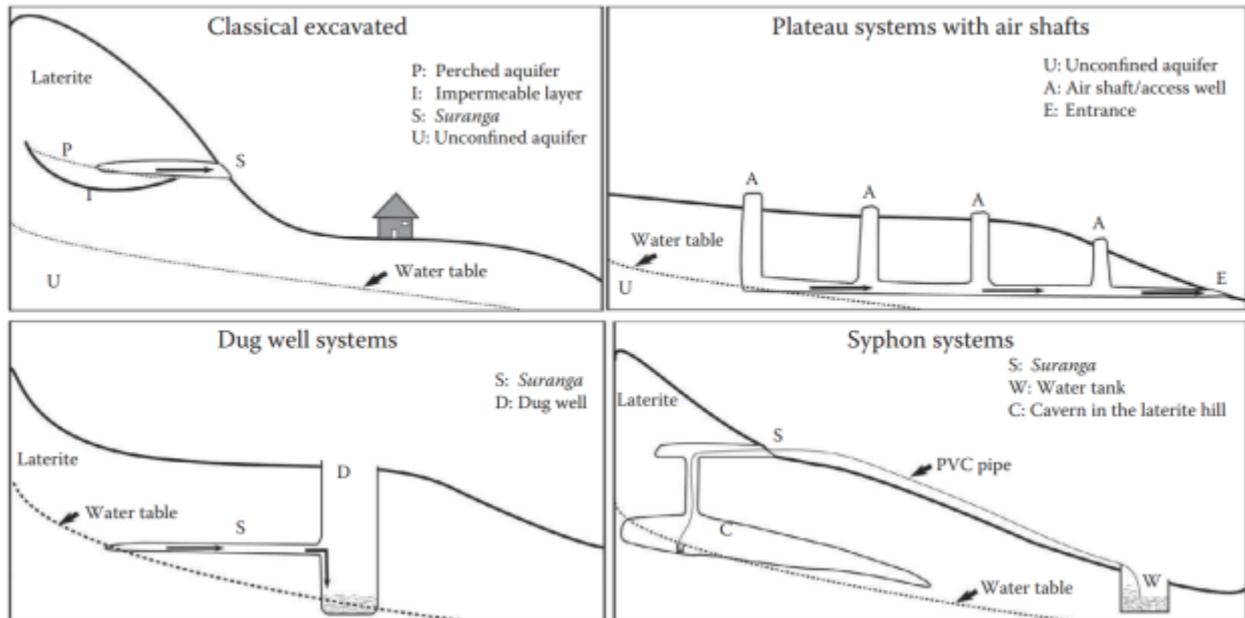


Abb. 19. Grundtypen der indischen Surangas (Angelakis et al. 2017). Erklärungen im Text.

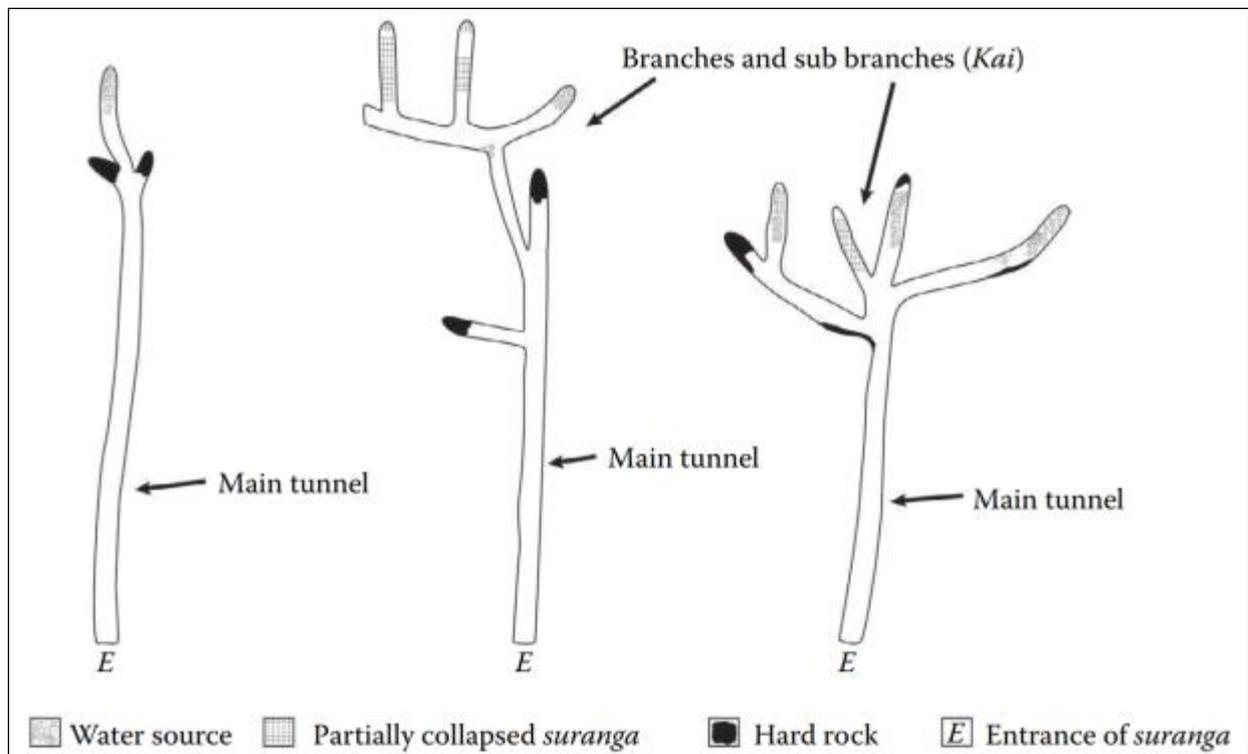


Abb. 20. Verzweigung von Surangas in Kai (= Finger; Angelakis et al. 2017).



Abb. 21. Karezas in Bidar, Karnataka, Indio
 (<https://www.deccanheritagefoundation.uk/project/rehabilitation-of-qanat-karez-at-bidar>).

3.4 Ostasien

Die Oase Turpan in den Wüsten der Region Xinjiang-Uigurien (Xinjiang) im Nordwesten Chinas nutzt Wasser aus Qanaten (lokal *Karez* genannt). In der Turpan-Schlucht gibt es über tausend dieser Systeme mit einer Gesamtlänge von etwa 5.000 Kilometern (Angelakis et al. 2017). Turpan war ein wichtiges Handelszentrum entlang des nördlichen Zweigs der Seidenstraße. Früher grenzte es im Südwesten an die Königreiche Korla und Karashar (<https://www.cleanriverstrust.co.uk/qanat/>). Die früheste Erwähnung von *Karez* stammt aus der Han-Dynastie (206 v. Chr. - 220 n. Chr.) in dem Geschichtswerk Shiji, Aufzeichnungen der Chronisten (93-91 v. Chr.). Die meisten der heutigen Anlagen wurden während des Mittleren Reichs (Qing-Reich) ab dem 17. Jahrhundert gebaut. Große Teile des fruchtbaren Landes werden auch heute noch von *Karezas* bewässert. Die Grabhügel Wudaolin und Wuxing können besichtigt werden (<http://www.chinatoday.com.cn/English/chinatours/turpan.htm>).

In Japan sind mehrere Dutzend Qanat-ähnliche Strukturen bekannt, insbesondere in den Präfekturen Mie und Gifu. Der lokale Name für diese Strukturen ist *mambo* (*manbo*). Angelakis et al. (2017) liefern Beispiele aus Japan für Aquädukte aus dem 17. - 19. Jahrhundert. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um unterirdische Wasserleitungen von Flüssen, die nur entfernt an Qanate erinnern.



Abb. 22. Karez bei Turfan, Xinjiang, China (<https://czwiki.cz/Lexikon/Kanát>).

3.5 Nordafrika

In Ägypten, oder besser gesagt in der ägyptischen Wüste, gibt es vier große Oasen. In einer von diesen, der Kharga-Oase, wurden Bewässerungssysteme mit Grundwasser nach dem Qanat-Prinzip eingehend untersucht. Diese Systeme gab es wahrscheinlich schon in der zweiten Hälfte des 5. Jahrhunderts v. Chr., als das Gebiet von den Persern besetzt war. Die Qanate wurden durch wasserführende Sandsteine gegraben und sammelten Wasser, das in kleinen Dämmen unterhalb des Auslasses aufgefangen wurde. Die Breite der Galerien beträgt etwa 60 cm und die Höhe variiert zwischen 5 und 9 Metern. Es ist wahrscheinlich, dass die Stollen bei sinkendem Grundwasserspiegel vertieft wurden. Das Wasser wurde hauptsächlich zur Bewässerung der Felder verwendet (<https://www.cleanrivertrust.co.uk/qanat/>).

In Libyen war der Einsatz von Qanat-Systemen vor allem in der abgelegenen Wüste im zentralen und südlichen Teil des Landes weit verbreitet. Die Nachhaltigkeit von Oasen mit menschlichen Siedlungen war direkt vom fossilen Grundwasser abhängig (Angelakis et al. 2017). *Foggare* werden beispielsweise aus dem Gebiet Garamantes bei Djerma (Germa, Jarma) erwähnt. Die Wassergänge sind weniger als 60 cm breit und etwa 1,5 m hoch und können mehrere Kilometer lang sein. Das gesamte unterirdische System umfasst etwa 600 Qanate mit einer Gesamtlänge von mehreren hundert Kilometern. Die Qanate wurden durch eine Reihe von vertikalen Schächten gegraben und unterhalten, die in regelmäßigen Abständen von etwa 10 m angeordnet waren (<https://www.cleanrivertrust.co.uk/qanat/>).

Das in Tunesien geschaffene *Foggara*-Wassermanagementsystem, das zur Schaffung von Oasen diente, ähnelt ebenfalls den iranischen Qanaten. *Foggaras* wurden am Fuße steilerer Gebirgszüge, wie dem östlichen Atlasgebirge, angelegt. Die Niederschläge in den Bergen gelangen in den Grundwasserleiter und wandern in Richtung der Sahararegion im Süden. *Foggaras* von 1-3 km Länge dringen in den Grundwasserleiter ein und sammeln Wasser. Die Familien unterhalten die *Foggaras* und ihr eigenes Land, das mit dem Wasser bewässert wird (<https://www.cleanrivertrust.co.uk/qanat/>).

Auch in Algerien dienen die *Foggaras* für die Bewässerung der Oasen. Die Länge der *Foggaras* wird hier auf Tausende von Kilometern geschätzt. *Foggaras* wurden möglicherweise schon 200 n. Chr. verwendet, sind aber erst seit dem 11. Jahrhundert, als sich der Islam hier ausbreitete, zuverlässig dokumentiert. Das Prinzip der Kondensation wird genutzt, um die Ausbeute an Feuchtigkeit zu erhöhen. Das Temperaturgefälle in den vertikalen Schächten führt dazu, dass die Luft durch natürliche Konvektion aufsteigt, wodurch feuchte Luft aus dem landwirtschaftlichen Bereich in den Stollen gesaugt wird und gegen den Abfluss strömt. Im Schacht schlägt sich die Feuchtigkeit an den Wänden nieder, und über die vertikalen Schächte steigt Luft auf. Das Kondenswasser läuft ab und füllt das Wasser im Stollen wieder auf. Dies ist also das entgegengesetzte Prinzip zu den persischen Windtürmen (<https://www.cleanrivertrust.co.uk/qanat/>).

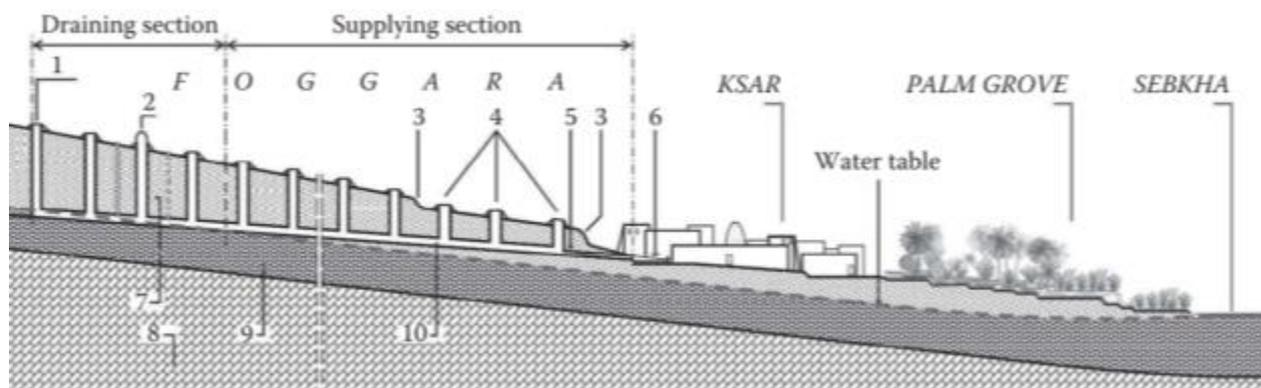


Abb. 23. Mit *Foggara* bewässerte Oase: (1) Hauptschacht, (2) Messschacht, (3) Steilhang, (4) Schächte, (5) *Aghussru* (Auslass), (6) *Kesria* (Reservoir mit Überlauf des Wassers in einzelne Kanäle), (7) durchlässige Schicht, (8) undurchlässige Schicht, (9) Grundwasserleiter, (10) Wasserstollen. *Ksar* = Stadt (Dahmen 2015).

In Südmarokko werden die Qanate *Khattaras* genannt. Einzelne Oasen im Draa-Tal und Tafilaft am Rande der Sahara sind seit dem späten 14. Jahrhundert vom Wasser aus den Schluchten abhängig. In Marrakesch und der Haouz-Ebene wurden die Qanate seit Anfang der 1970er Jahre aufgegeben, da sie nach und nach austrockneten. Im Gebiet von Tafilaft ist die Hälfte der 400 *Khattaras* noch in Gebrauch (Lightfoot 1996).

3.6 Lateinamerika

In Mexiko sind zahlreiche Wassergalerien, sogenannte *galerías filtrantes*, aus dem Gebiet zwischen den Städten Tepeaca und Acatzingo de Hidalgo (Bundesstaat Puebla) dokumentiert, von denen allgemein angenommen wird, dass sie zwischen dem 16. und der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts errichtet wurden (Angelakis et al. 2017).

In Südamerika (Peru, Nordchile) werden qanatähnliche Wasserwerke *puquios* genannt. Ein Beispiel dafür ist das Cantalloc (auch Cantayo) Aquädukt der Nazca-Kultur im heutigen Peru, das eine Stadt mit Wasser versorgte und zur Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen in einer ansonsten trockenen Region diente. Sein Alter wird auf 1.500 bis 2.000 Jahre geschätzt. Es wurde 1605 entdeckt und die erste Erwähnung seiner Existenz stammt von dem spanischen Chronisten Reginald de Lizaraga. Um eine unterirdische Wasserversorgung vom 12 km entfernten Berg Cerro Blanco aufzubauen, wurden zunächst Schächte im Abstand von 20-50 m gegraben, bis der Grundwasserleiter erreicht war. Es gibt mehr als 30 dieser Schächte, die *ojos de agua* ("Wasseraugen") genannt werden. Sie sind 4-5 m tief und über einen spiralförmigen Gang begehbar. Sie dienen auch als Inspektions- und Wartungsstellen. Sie sind durch eine Galerie verbunden, die noch funktionstüchtig und hoch genug ist, um für Menschen begehbar zu sein (Veselsky 2018).



Abb. 24. Gebiet der zentralen Anden mit Standorten von Puquios-Systemen (Angelakis et al. 2017).



Abb. 25. Cantalloc, Peru. Kontrollschächte (ojos de aqua) auf dem Cerro Blanco im oberen Teil des Systems (<https://en.wikipedia.org/wiki/Puquios>).



Abb. 26. Cantalloc, Peru. Detail des Kontrollschachts (ojo de aqua) auf dem Cerro Blanco (https://en.wikipedia.org/wiki/Cantalloc_Aqueducts).



Abb. 27. Cantalloc, Peru. Auslauf des Wasserstollens in den Bewässerungskanal (Foto Davide Mauro, <https://en.wikipedia.org/wiki/Puquios>).

3.7 Europa

Während der arabische Einfluss auf die antike Architektur unbestreitbar ist, ist die Verbindung der römischen unterirdischen Aquädukte mit den persischen Qanaten nicht eindeutig dokumentiert (Angelakis et al. 2017). Die Parallelität dieser Strukturen in Regionen außerhalb des südlichen Mittelmeerraums ist besonders problematisch. Im Falle des antiken Griechenlands beispielsweise argumentiert Wilson (2008), dass die Technik der Schächte und Aquädukte bereits vor der Achämenidenzeit in Persien (6.-4. Jh. v. Chr.) angewandt wurde, der die Entwicklung und Verbreitung von Qanaten im Nahen Osten zugeschrieben wird.



Abb. 28. Verbreitung der Qanatsysteme in Europa (nach Weingartner 2007).

Der berühmteste Wasserstollen Italiens ist der so genannte Claudio-Tunnel, der auf einer Länge von 5.653 m gebaut wurde, um das Wasser aus dem größten Binnensee Italiens, dem Fucine-See, abzuleiten. Der Wassertunnel wurde in einer dem Qanatbau ähnlichen Technik gebaut, mit bis zu 122 m tiefen Schächten. In Sizilien war die gesamte antike Stadt Palermo mit einem umfassenden Wassermanagementsystem ausgestattet, das auf dem Vorhandensein von Qanaten beruhte, die während der arabischen Periode 827-1072 gebaut wurden (Lofrano et al. 2013). Viele der Strecken sind inzwischen kartiert worden. Einige davon können heute besichtigt werden. Die berühmte "cámara di scirocco" (scirocco = feuchter Südostwind) in der Villa Savagnore verfügt über ein Klimatisierungssystem, das auf dem Windturm-Prinzip basiert (Todaro et al. 2006).

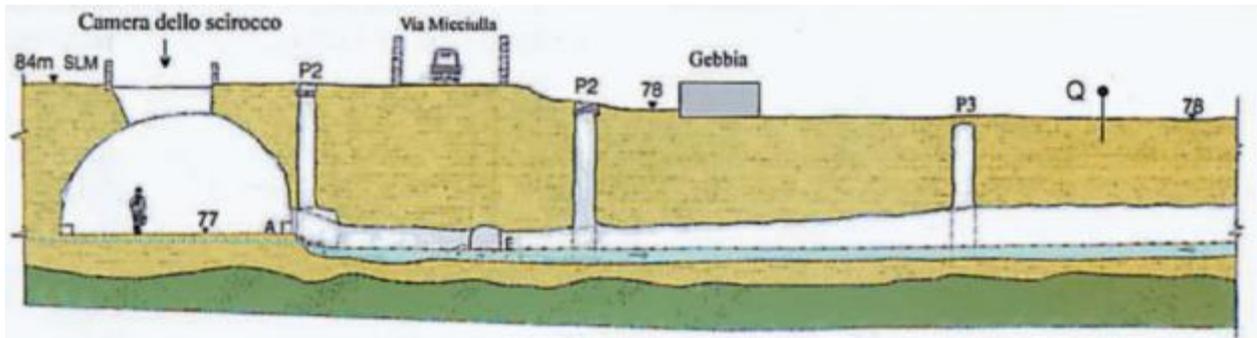


Abb. 29. Querschnitt durch den Uscibene-Qanat in Palermo mit dem Windraum unter der Villa Savagnore (Todaro et al. 2006).



Abb. 30. Qanate in Sizilien. Links: Canalotto im Zentrum Siziliens (<https://czwiki.cz/Lexikon/Kan%C3%A1t>). Rechts: Gesuittico Basso in Palermo (<https://www.atlasobscura.com/places/qanat-di-palermo>).

In Spanien sind zahlreiche Beispiele für *Galerías*-Systeme bekannt, die wahrscheinlich von den Mauren während ihrer Herrschaft auf der Iberischen Halbinsel in dieses Gebiet gebracht wurden. Die Website www.cleanriverstrust.co.uk listet solche Systeme von den Nordhängen der Sierra de Alhambra in Andalusien und aus Granada auf.

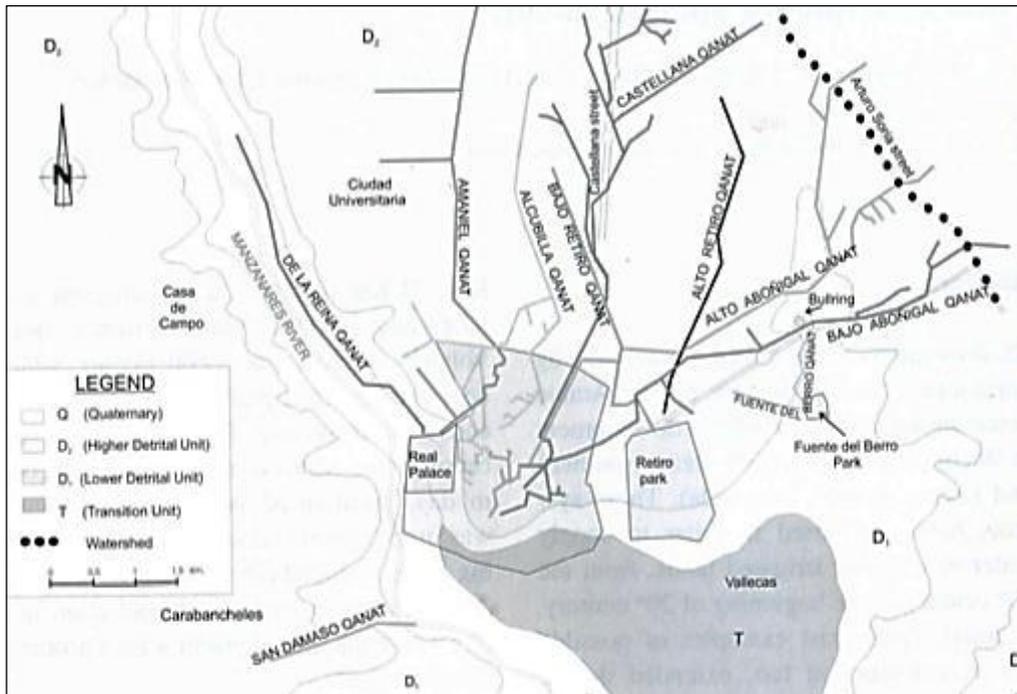


Abb. 31. Qanate in Madrid (Schram 2013).

In Griechenland waren zwei Dürreperioden am Ende des 8. und im 4. Jahrhundert v. Chr. der Grund für den Bau von langen Aquädukten. Aquädukte wurden entweder als mit Steinplatten bedeckte, an der Oberfläche ausgehobene Kanäle (z. B. Peisistrata, Acharnia) oder mit Hilfe von Schächten und Galerien (Ägina, Megara) gebaut. Während oberirdische Strukturen dem Zahn der Zeit nicht standgehalten haben, haben unterirdische Systeme über Jahrhunderte hinweg ihre Funktionalität bewahrt (Angelakis et al. 2017). Eines der berühmtesten Bauwerke dieser Art ist das so genannte Eupaline-Aquädukt. Das Eupaline-Aquädukt ist ein 1.036 m langer Wassertunnel, der durch den Berg Kastro auf der Insel Samos in Griechenland führt. Er wurde um 550 v. Chr. von Polykrates in Auftrag gegeben, um die Stadt Pythagorion mit Wasser zu versorgen. Der Hauptzweck war der Transport von Wasser aus einer Quelle in der Nähe des Dorfes Ayiades, aber an beiden Enden wurden kurze Seitenstollen zum Sammeln von Grundwasser angelegt, die den Qanaten ähnelten (https://en.wikipedia.org/wiki/Tunnel_of_Eupalinos).

In Kroatien, genauer gesagt in der gesamten ehemaligen römischen Provinz Dalmatien, gab es in fast allen städtischen Zentren Aquädukte. Die meisten von ihnen stammen aus dem ersten Jahrhundert nach Christus und weisen die üblichen Merkmale auf - freie Höhe in den Gängen, gute Belüftung und Schächte für die Inspektion und Reinigung. Das technische Design hat immer die Qualität des Wassers begünstigt, weshalb ein großer Teil der damaligen Quellen heute noch genutzt wird (Angelakis et al. 2017).

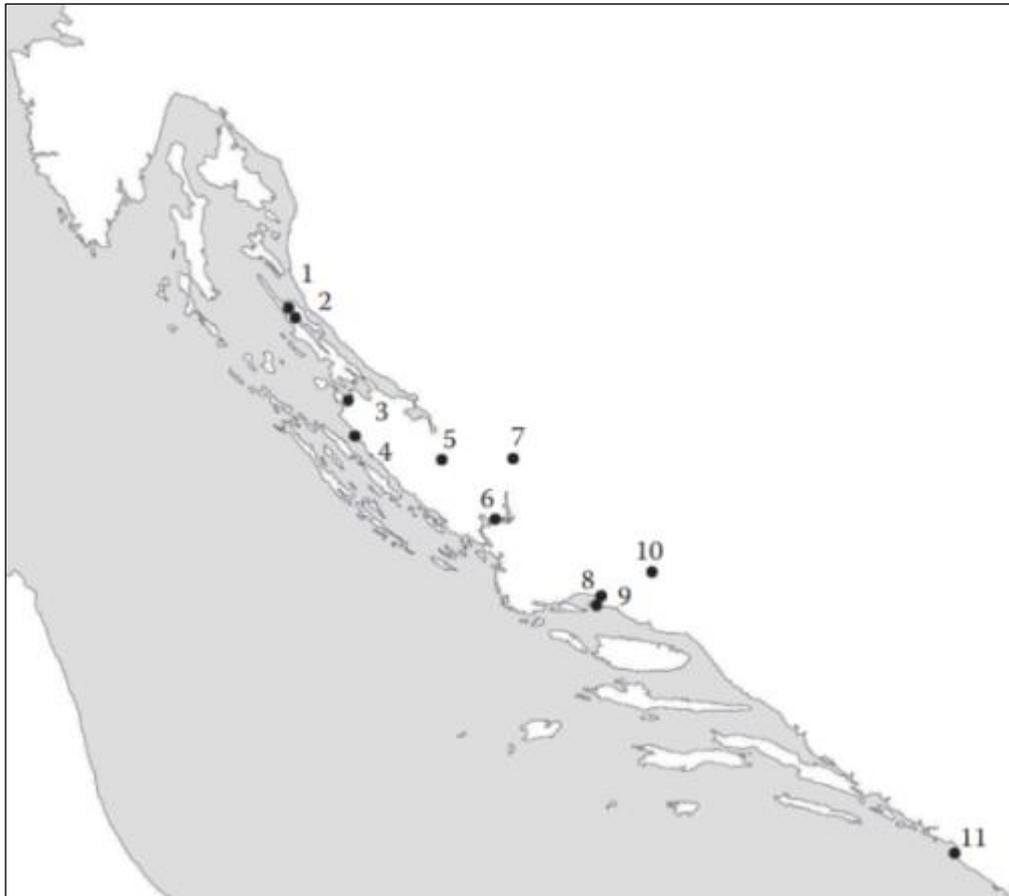


Abb. 32. Römische Aquädukte in Dalmatien: (1) Navalía und (2) Cissa (Insel Pag), (3) Aenona und (4) Jader bei Zadar, (5) Asseria östlich von Benkovač, (6) Scardona bei Šibenik, (7) Burnum (römisches Militärlager an der Krka), (8) Salona, (9) Diokletianpalast in Split, (10) Tilurium (Gadun), (11) Epidaurum bei Dubrovnik (Angelakis et al. 2017).

In Deutschland ist eine Reihe von unterirdischen römischen Aquädukten bekannt (Angelakis et al. 2017). Dazu gehören das Eifel-Aquädukt für die Wasserversorgung von Colonia Claudia Ara Agrippinensium (das heutige Köln), das Mogontiacum-Aquädukt (Mainz), der Wasserstollen in Drove (Heiliger Pütz, Nordrhein-Westfalen) und das unterirdische Aquädukt im Ruwertal bei Waldrach, das der Versorgung der römischen Stadt Augusta Treverorum (heute Trier) diente. Kremer (2003) listet 18 Qanatsysteme in der Umgebung von Trier, zwei Aquädukte im Moselgebiet (Mehring, Pölich) und Wasserstollen in Brey in der Nähe von Koblenz am Rhein, Retterich (Mayen) und Miesenheim (Mayen) auf. Im Jahr 2005 wurde in Alt-Inden (Düren) (mittlerweile durch Braunkohletagebau abgebaggert) im Rheinland ein unterirdisches Aquädukt entdeckt. Das Spektrum der Bautypen reicht von unterirdischen Tunneln (die teilweise mit Qanaten vergleichbar sind) bis zu überdachten Wasserkanälen, die mit Steinplatten knapp unter der Erdoberfläche gebaut werden. Teile dieser Aquädukte sind für die Öffentlichkeit zugänglich (www.romanaqueducts.info/index.html).

Im Rahmen der Erforschung von Wassersammelstollen im bayerisch-böhmischen Grenzgebiet gab Klaubert (1967) Auskunft über ähnliche Strukturen in Bayern. In Bayreuth-Saas war ein 940 m langer und ca. 40 m tiefer Qanat mit einem Hauptstollen und einem Nebenstollen als Teil des städtischen Wasserwerks damals noch in Betrieb. Der Stollen wurde zwischen 1847 und 1859 von Bergleuten gebaut. In Neunkirchen bei Weiden handelt es sich um einen etwa 80 Meter

langen Qanat, den Historiker fälschlicherweise für einen Fluchttunnel aus dem Mittelalter gehalten haben. Eine interessante Entdeckung wurde auch im Flussgebiet der Scherkonde südlich von Weimar in Thüringen gemacht - ein sehr alter, teilweise eingestürzter, 130 Meter langer Wassertunnel.

Ein besonders gut erhaltenes Beispiel für ein römisches Wasserwerk im Süden Luxemburgs ist der Raschpétzer bei Walferdange (<https://lb.wikipedia.org/wiki/Raschpétzer>). Nach Angelakis et al. (2017) entspricht er nicht vollständig der Definition eines Qanats, was vor allem auf das Fehlen eines sogenannten Hauptbrunnens zurückzuführen ist (das Wasser wird entlang des gesamten Verlaufs von aquiferen Sandsteinen aufgefangen). Auf jeden Fall ist es das bisher umfangreichste dokumentierte System seiner Art nördlich der Alpen. Von der Gesamtlänge des Tunnels von 600 m sind ca. 330 m befahrbar, und es wurden zwischen 20 und 25 Schächte dokumentiert. Es wird vermutet, dass das System eine große römische Villa am Hang des Alzette-Tals mit Wasser versorgte. Sie wurde in der gallorömischen Zeit, wahrscheinlich um 150 n. Chr. erbaut und war etwa 120 Jahre lang in Betrieb.

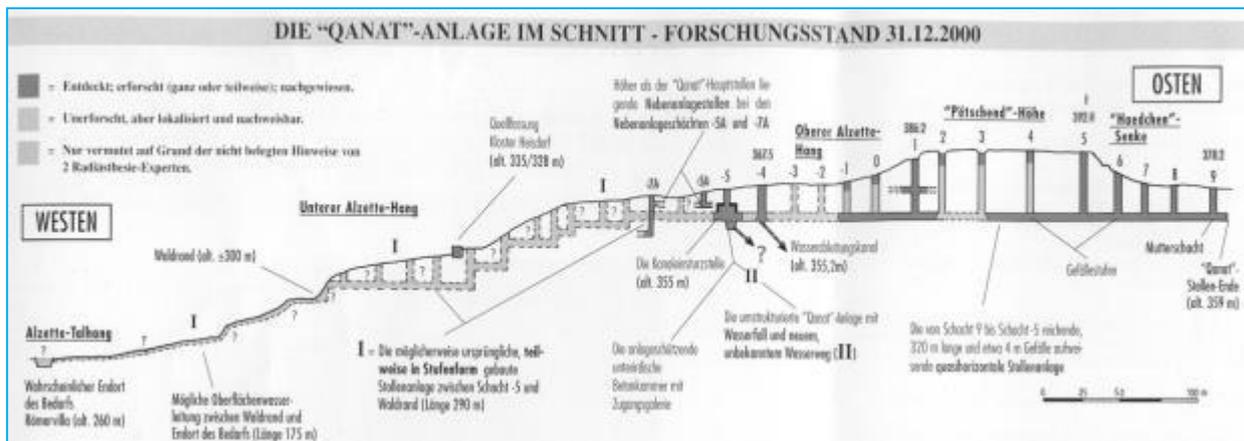


Abb. 33. Raschpétzer bei Walferdange (Schram 2013).

4 Qanate im bayerisch-böhmischen Grenzgebiet

Die Hauptgrundwasserquelle im bayerisch-böhmischen Grenzgebiet sind gegrabene oder gebohrte Brunnen, die aus Grundwasserleitern gespeist werden. In der Region Aš und in den angrenzenden Gebieten Bayerns und Sachsens gibt es jedoch auch eine Reihe von horizontalen Schöpfwerken, die nach einem ähnlichen Prinzip wie die persischen Qanate gebaut sind. Diese sind Gegenstand des einzigen international veröffentlichten, umfassenden Werks des in Aš gebürtigen Helmut Klaubert aus dem Jahr 1967, aus dem die meisten Informationen in diesem Kapitel entnommen sind. Heinrich & Arzberger (2009) haben eine jüngere Dokumentation von unterirdischen Wasserstollen in der Stadt Selb und Umgebung vorgelegt.

Die Existenz der unterirdischen Wasserbauten in Selb wurde 1964 zufällig entdeckt, als beim Bau der neuen Rosenthal-Porzellanfabrik eine schwere Maschine in einen bis dahin unbekanntem unterirdischen Raum einbrach. In der Folge wurde ein ganzes System der längst vergessenen und in einigen Fällen überraschenderweise immer noch in Betrieb befindlichen Wasserstollen entdeckt. Über die Geschichte des Baus und der Nutzung der Wasserstollen in der Region gibt es bisher nur vereinzelt Belege. Es ist wahrscheinlich, dass teils Bergleute aus den umliegenden Bergbaurevieren ihr Wissen für den Stollenvortrieb einbrachten. Untertage-Bergbau ist in der Region seit dem 14. Jahrhundert belegt.

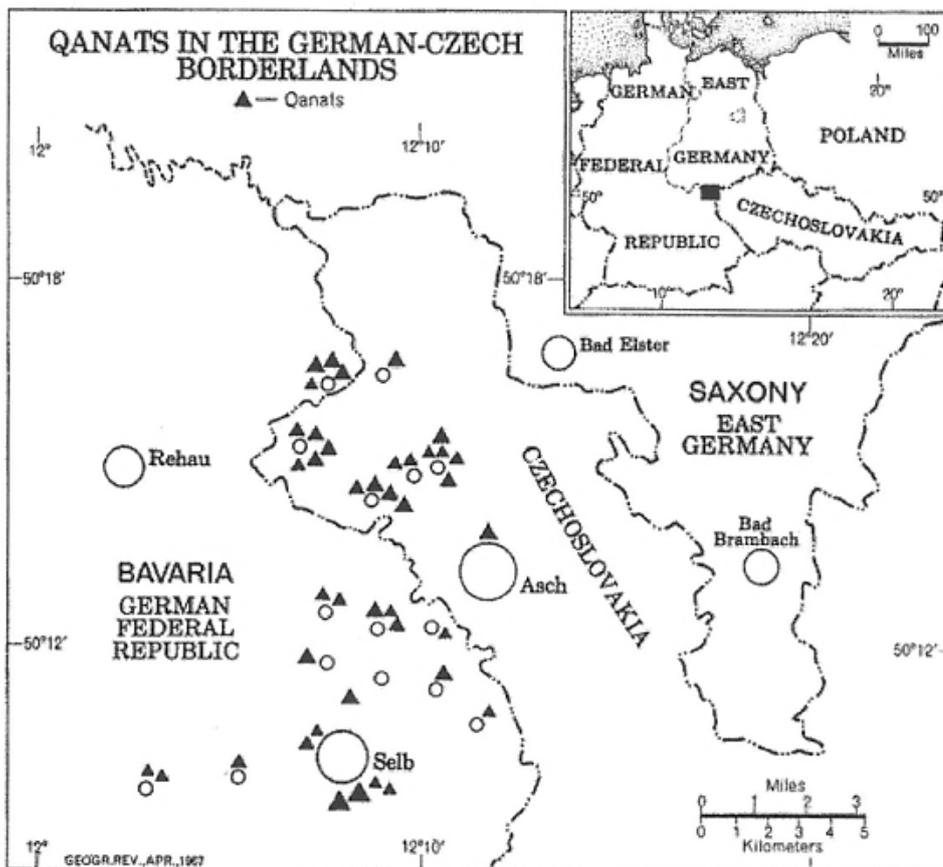


Abb. 34. Vorkommen von Qanaten im bayerisch-böhmischen Grenzgebiet (aus Klaubert 1967).

In den 1960er Jahren dokumentierte Klaubert (1967) im östlichen Fichtel- und im Elstergebirge etwa 1.000 Meter wasserführender Stollen (Abb. 34). Die durchschnittliche topographische Höhenlage der Stollen beträgt hier etwa 650 m ü. NN. Die Stollen, die von Klaubert als Qanate bezeichnet werden, sind in eine Vielzahl von Gesteinen vorgetrieben (Granit, Quarzit, Gneis,

Glimmerschiefer, Phyllit, Basalt). Wie andere Qanate haben sie einen Abschnitt, in dem sich das Wasser sammelt (well room/Brunnenstube, Lightfood, pers. Mitt.), und einen Abschnitt, in dem es abgeleitet wird (spring water tunnel, Lightfood, pers. Mitt.). Das Wasser wird in der Regel in ein Reservoir geleitet, von wo aus es in das Haus oder den Stall gebracht wird. Der Rest fließt oft durch einen Überlauf in einen Sumpf und dann in einen Teich. H. Klaubert erwähnt diese Methode der Wassergewinnung in den Dörfern Plössberg, Spielberg, Fassmannsreuth, Mühlbach, Reichenbach und Wildenau.

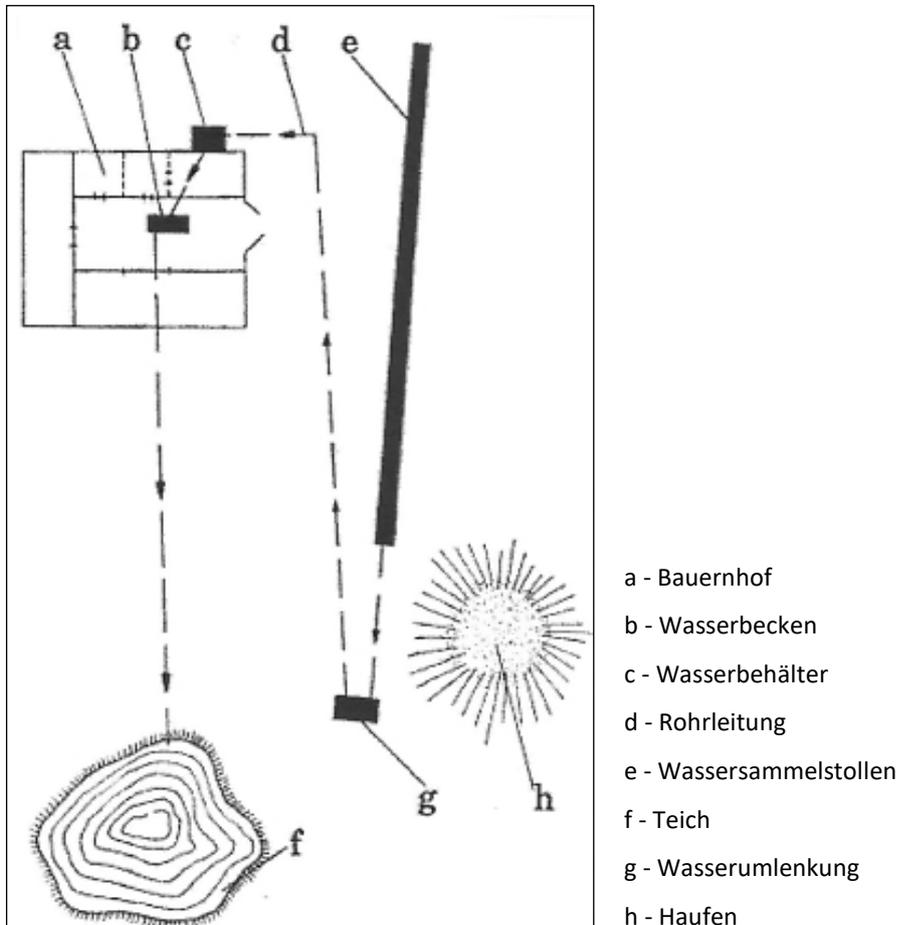


Abb. 35. Schema der Wasserversorgung aus einem Wasserversorgungsstollen im bayerisch-böhmischen Grenzgebiet (Klaubert 1967).

Klaubert unterscheidet zwischen Qanaten mit Schächten und ohne sowie Qanaten mit Erddämmen und ohne. Ein Querschnitt eines Qanats mit Schächten ist in Abb. 36 dargestellt. Während des Baus wurde zunächst die Lage des Mutterschachtes bestimmt. Nachdem dieser ausgehoben war, wurden in gleichem Abstand weitere Schächte abgeteuft und der Stollen begonnen. An der Austrittsstelle wurde zunächst ein Graben (IV) ausgehoben, der nach dem Auftreffen auf das feste Gestein durch einen Stollen (III) fortgesetzt wurde, der die beiden Schächte miteinander verband. Die Sohle des Schachts bzw. des Wasserstollens lag idealerweise zwei Drittel unter dem Grundwasserspiegel.

Die durchschnittliche Höhe der Stollen beträgt 1,6 m, außer im Granit, wo der Vortrieb schwieriger war. Die Breite schwankt zwischen 0,5 und 0,7 m, was wiederum von der Festigkeit des Gesteins abhängt. Am Boden des Stollens befindet sich häufig eine Rinne mit einem Trog oder einem Rohr aus Holz, Eisen oder Steingut, das einen reibungslosen Abfluss ermöglicht und

ein Versickern in das umgebende Gestein verhindert. In den meisten Stollen liegt der Wasserspiegel zwischen 0,2 und 0,6 m über der Stollensohle. Auffallend sind zahlreiche Beleuchtungsnischen, die sich vor allem in den Kurven der Tunnel befinden. In diesen Nischen befinden sich noch Reste von Talgkerzen und -lampen.

Die Einstiege zu den Schächten sind mit Steinen trocken gemauert und mit einer schweren Steinplatte abgedeckt. Zur Tiefe hin verbreitern sich die Schächte im Allgemeinen von etwa 0,6 m auf 1-2 m an der Sohle. Die Wände sind nach Klaubert (1967) in der Regel mit stufenartigen Eintiefungen für die Füße der Hauer versehen. Es könnte sich dabei allerdings auch um Vertiefungen für Balken der Zwischenböden handeln.

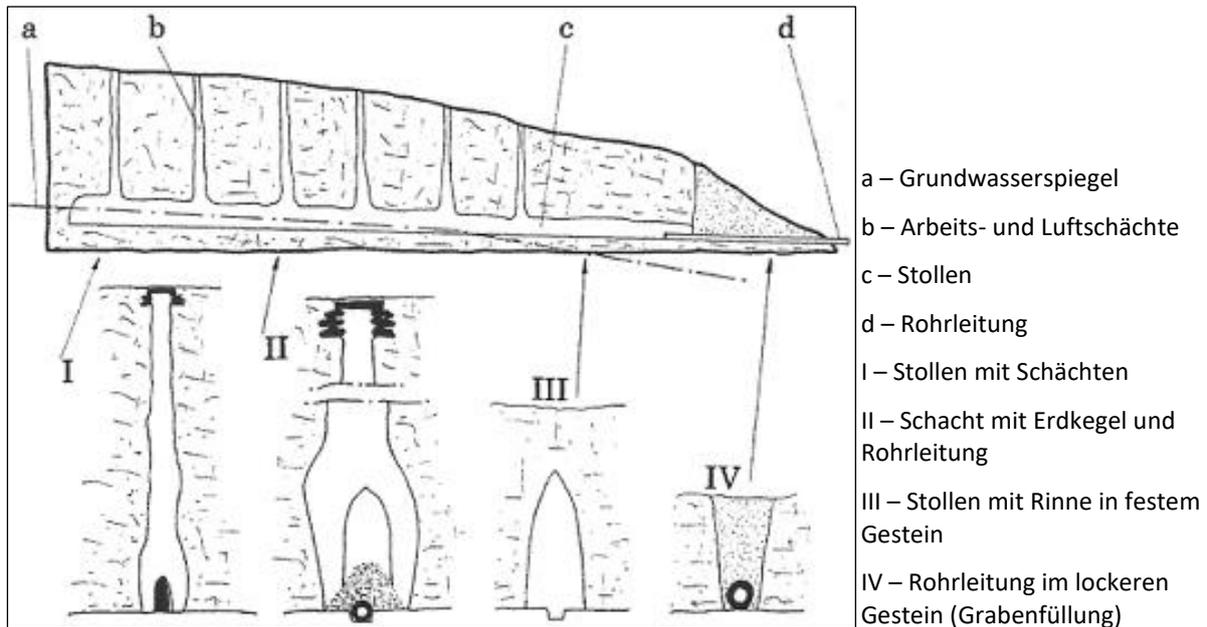
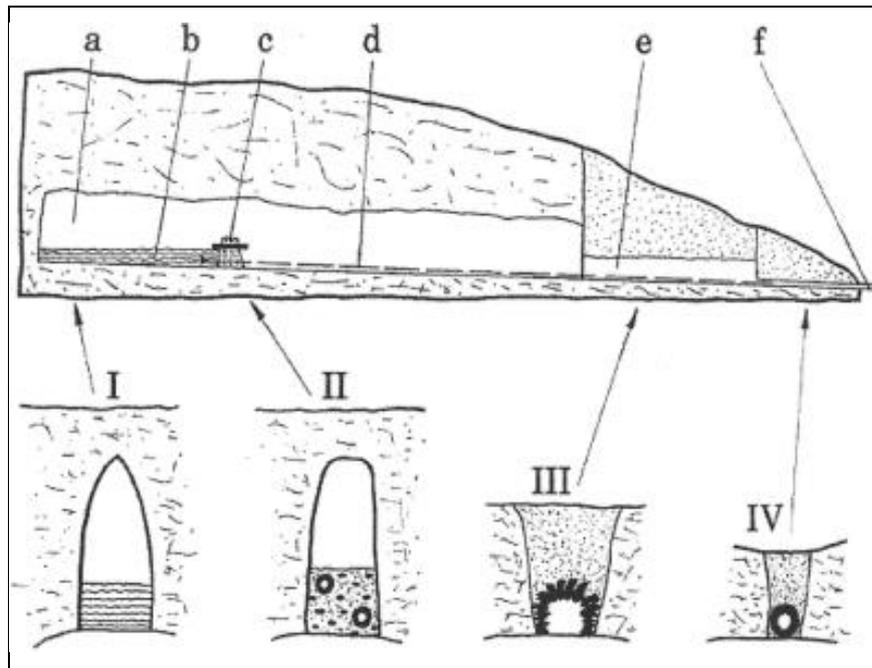


Abb. 36. Längs- und Querschnitte durch den Qanat mit Schächten (Klaubert 1967).

Es gibt auch Wasserauffangstollen ohne Schächte, mit einer Rinne und einem Holzrohr an der Mündung. In Selb sind diese einfachen Wassersammler durch die Absenkung des Grundwasserspiegels völlig ausgetrocknet. Die mit Schiefer- oder Granitplatten trocken ausgekleideten Kanäle sind etwa 0,5 m breit und 0,6 m hoch, wobei die Höhe an der Einmündung des Kanals in die Strecke leicht zunimmt. Ursprünglich bestand das Rohr aus ausgehöhlten Kiefernstämmen, 2-6 m lang, mit einer durchgehenden Bohrung von etwa 8 cm Durchmesser. Später wurden die leicht verrottenden Holzrohre durch Rohre aus verzinktem Eisen oder Steingut ersetzt. Abb. 37 zeigt ein Qanat mit einem Erddamm bzw. einer Staumauer, von dem bzw. der aus, das Wasser über eine gemauerte Rinne oder ein Rohr weitergeleitet wurde.



- a – Strecke
- b – Grundwasserspiegel
- c – Erddamm mit Überlaufrohr
- d – Rohr mit Schmutzfänger
- e – Kanal mit Mauerung
- f – Rohrleitung
- I – Stollen mit Wasserspiegel
- II – Stollen mit Staumauer oder Erddamm
- III – Kanal mit Steinmauerung
- IV – Rohrleitung im lockeren Gestein (Grabenfüllung)

Abb. 37. Längs- und Querschnitte durch einen schachtlosen Qanat mit Erddamm (Klaubert 1967).

4.1 Wassergewinnungsstollen im Raum Selb

In der Gegend von Selb listet Klaubert (1967) eine Reihe von unterirdischen Gängen auf, die in ihrem Charakter dem von Qanaten entsprechen. Die wichtigsten davon sind in der folgenden Tabelle aufgeführt. Außerdem nennt Klaubert fünf weitere Stollen, die damals noch nicht erforscht waren. Einer davon befindet sich in Mühlbach und vier in der Gemeinde Fassmannsreuth nahe der tschechischen Grenze. Zwei der Qanate in Fassmannsreuth versorgten noch zu Klauberts Zeiten die Bauernhöfe mit Trinkwasser, die beiden anderen wurden bei Bauarbeiten zerstört, die Stollen sollen aber erhalten geblieben sein.

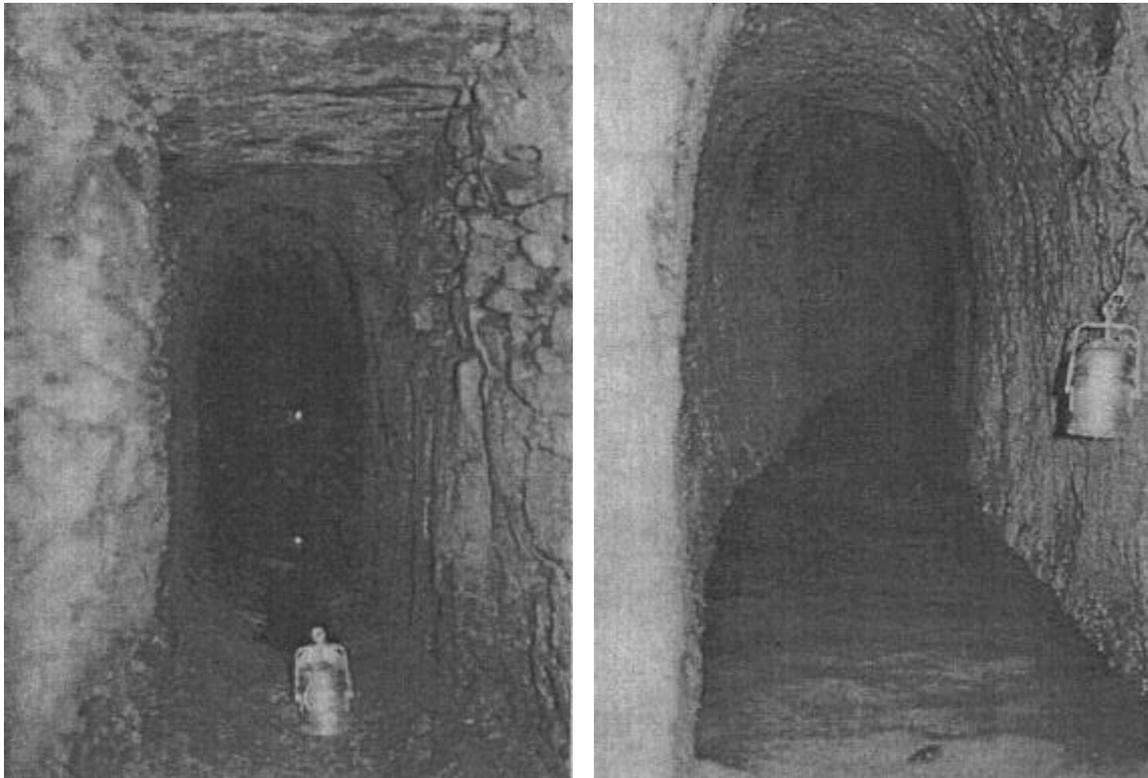


Abb. 38. Wassergewinnungsstollen in der Umgebung von Selb (aus Klaubert 1967). Links: Stollen mit Steinauskleidung, Oberweissenbach. Rechts: Funktionsfähiger Wasserstollen, Wildenau.



Abb. 39. Einstieg zum Qanat in Wildenau – der Zugang ist mit einer schweren Steinplatte abgedeckt (Klaubert 1967).

Tabelle 2. Qanate um Selb, dokumentiert von Klaubert (1967).

Nr.	Ort	Bauzeit	Geschätzte Länge	Anzahl der Schächte	Bemerkungen
1	Selb, Roter Bühl	unbekannt	55 m	0	trocken, sandverschmutzt, 25 m langer Steinkanal mit Granitplatten ausgekleidet; Abfluss (ca. 55 m) durch ein Kiefernrohr; 1964 zerstört, 1965 wiederaufgebaut
2	Selb, Jahnstrasse	1873-1880	340 m	7	funktionsfähig; Haupt- und Seitenstollen; Mutterbrunnen 7,5 m tief; Anschluss an die städtische Kanalisation zum Selber Bach; Pläne und Dokumentation vorhanden
3	Selb, Körnerstrasse	ca. 1790	125 m	3	funktionsfähig; Tiefe des Mutterschachtes 12 m; ein Eisenrohr versorgt das Reservoir („Bassin“); Keramikrohre auf der Sohle des Stollens
4	Selb, Ludwistrasse	unbekannt	33,5 m	0	trocken; verbunden mit Kellern
5	Selb, August-Bebel-Strasse	vor 1868	6,25 m	0	Überreste eines Qanats, der mit den Kellern verbunden war; erbaut vom Kaufmann Christoph Krippner
6	Selb, Hohenberger Strasse	unbekannt	17 m	0	trockene Überreste des Qanats, verbunden mit den Kellern; zwei Brunnen 9 und 12 m im Keller
7	Selb, Marienstrasse	unbekannt	5,6 m	0	Überreste eines Qanats, mit Kellern verbunden
8	Oberweissenbach	unbekannt	80 m	0	funktionsstüchtig; Versickerungen in lockeren Schichten an der Mündung; steinerne Rinne aus Glimmerschiefer; Überreste einer Holzleitung; versorgte einen 1815 erbauten Bauernhof mit Wasser
9	Plössberg	unbekannt	67,9 m	0	funktionsfähig; Erddamm im Stollen; Eisenrohr zum Wassertank („Bassin“) und dann zum Hausflur, wo sich eine Handpumpe befindet; Zufluss 5 Liter pro Minute
10	Längenau	ca. 1850	15,9 m	1	funktionsfähig; Stollen mit Ziegeldecke; undatiertes Dokument
11	Wildenau	1840	125 m	2	funktionsfähig; ein Schacht verschüttet, versorgt immer noch zwei Bauernhöfe mit Wasser; datiert nach Angaben der Bewohner

Nr.	Ort	Bauzeit	Geschätzte Länge	Anzahl der Schächte	Bemerkungen
12	Reichenbach	1927	70 m	1	funktionsfähig; Eisenrohr führt zur Küche des Hauses; Keramikrohr im Stollen; Zufluss ca. 5 Liter pro Minute; erbaut von den Grundbesitzern Hans und Adolf Summerer
13	Lauterbach	unbekannt	120 m	0	funktionsfähig; Wasser wird in einen darüber liegenden Tank gepumpt; weitere Behälter für die Küche und die Ställe; Überlauf in ein Wasserbecken und einen Teich; Schema in Abb. 35
14	Spielberg	unbekannt	55 m	1	funktionsfähig; versorgt ein 300 Jahre altes Bauernhaus mit Wasser

4.2 Wassergewinnungsstollen im Raum Aš

Erforschung von H. Klaubert (1967)

Die Angaben von Klaubert (1967) zu den Kanälen auf tschechischem Gebiet beruhen auf Informationen von nach dem 2. Weltkrieg vertriebenen deutschen Siedlern. Nach dem Krieg lag Aš in einem unzugänglichen Grenzgebiet und ein großer Teil der Bauernhöfe wurde dem Erdboden gleichgemacht. Jegliche kulturelle und wirtschaftliche Kontinuität wurde unterbrochen, die unter dem nachfolgenden kommunistischen Regime nie wiederhergestellt wurde. Die traditionelle Art der Bewirtschaftung des Landes geriet in Vergessenheit.

Die von Klaubert erhaltenen Informationen sind in der folgenden Tabelle aufgeführt. Der Autor erwähnt auch sechs weitere Qanate - einen davon in dem ehemaligen Ort Mähring (seit 1950 aufgelöst) nördlich von Krásná, zwei in Štítary (früher Schildern) und drei in Smrčina (früher Elfhausen) bei Podhradí. Es ist ihm jedoch nicht gelungen, konkrete Informationen zu diesen Objekten zu erhalten.

Klaubert (1967) listet insgesamt 17 Qanat-Objekte in der Region Aš auf.

Tabelle 3. Qanate im Gebiet Aš, dokumentiert von Klaubert (1967).

Nr.	Ort	Bauzeit	Geschätzte Länge	Anzahl der Schächte	Bemerkungen
1	Aš	unbekannt	50 m	1	Stollen mit Lichtschacht am südwestlichen Hang des Hainberges (Háj)
2	ehem. Gottmannsgrün nördlich von Pomezí	unbekannt	200 m	0	ehem. Thoma-Haus; der Stollen wurde von Italienern vorgetrieben
3	Újezd (ehem. Mähring) NW von Krásná	unbekannt	130 m	1	ehem. Komdörfer Hof
4	Újezd (ehem. Mähring) NW von Krásná	unbekannt	115 m	0	ehem. Oertel Hof
5	Újezd (ehem. Mähring) NW von Krásná	unbekannt	40 m	1	ehem. Wölfel Hof
6	Újezd (ehem. Mähring) NW von Krásná	unbekannt	75 m	0	ehem. Benke Hof
7	Újezd (ehem. Mähring) NW von Krásná	ca. 1750	50 m	1	ehem. Záh Hof
8	Újezd (ehem. Mähring) NW von Krásná	1700-1725	800 m	2	ehem. Popp Hof; 1907 erweitert
9	Štítary (ehem. Schildern)	ca.1750	255 m	0	ehem. Michael Hof; von den Italienern vorgetrieben
10	Kamenná (ehem. Steinpöhl/Steinböhl)	ca.1817	90 m	1	ehem. Wölfel Hof; von einem alten Mann während der Hungersnot vorgetrieben, um Geld für Tabak zu beschaffen
11	Kamenná (ehem. Steinpöhl/Steinböhl)	1820-1838	60 m	1	ehem. Riedel Hof

Forschungen durch B. Karban und Kollegen (2008-2012)

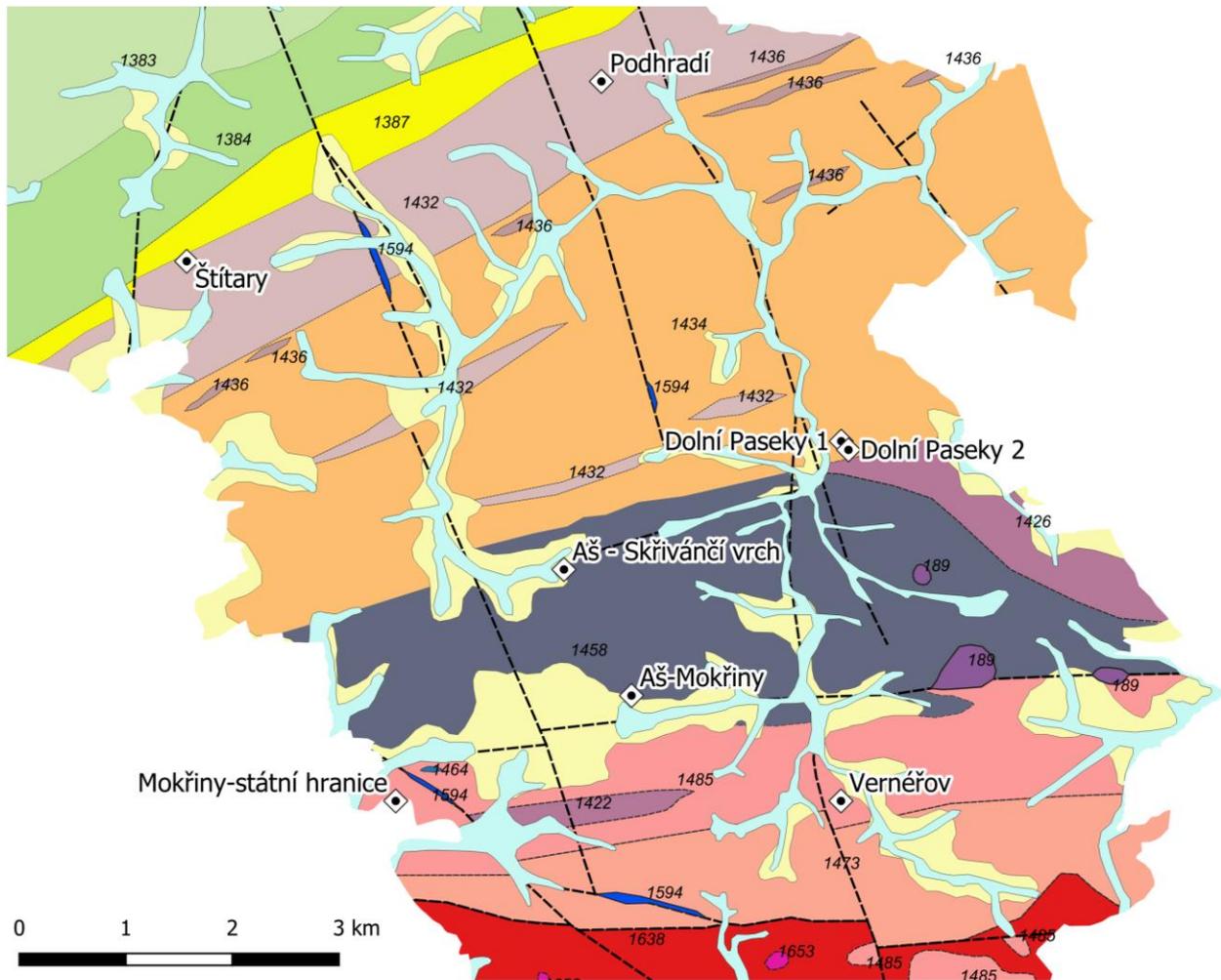
Seit Mitte der 1990er Jahre wird die Erforschung der horizontalen Wassergänge in der Aš-Region von den Fachleuten des Stadtmuseums Aš und seit Beginn des 21. Jahrhunderts von einer Gruppe von Amateurforschern durchgeführt. Die Wasserwerke in Mokřiny, auf dem Skřivánčí vrch in Aš, in Dolní Paseky und in Podhradí wurden eingehend dokumentiert. Die Ergebnisse wurden auf der Website www.thonbrunn.cz veröffentlicht und sind im Anhang zu diesem Bericht übernommen.

Das Untersuchungsgebiet wird von Gesteinseinheiten der Saxothuringischen Zone aufgebaut, die in der geologischen Karte im nördlichen Abschnitt Streifen in SW-NE und im südlichen Bereich in W-E-Richtung bilden. Ungefähr nördlich der Linie Štítary-Podhradí handelt es sich um Phyllite und quarzitische Phyllite, demnach um geringmetamorphe Metasedimente der Frauenbach-Serie des sächsisch-vogtländischen Kristallins. Die weiter südlich vorkommenden Metasedimente, Glimmerschiefer, Paragneise und Orthogneise sind stärker druck- und temperaturveränderte Gesteine, die als Fichtelgebirgs-Kristallin eingestuft werden. Im Süden treten die Granite des Erzgebirgsplutons an die Erdoberfläche. Die tektonischen Linien verlaufen überwiegend in NNW-SSE-Richtung und weisen stellenweise Quarzgänge auf. Östlich von Aš sind mehrere Körper von neovulkanischem Basaltgestein (Nephelin-Basanite) dokumentiert. Quartäre Ablagerungen von größerer Mächtigkeit sind in der geologischen Karte (Abb. 40) durch Hanglehne und Ablagerungen von Wasserläufen dargestellt.

Die dokumentierten Wassergewinnungsstollen wurden in einer Zone mit oberflächennaher Gesteinsverwitterung angelegt, die aufgrund ihrer Wasserdurchlässigkeit ein guter Leiter für eine flache Grundwasserzirkulation ist. Die Quartärbedeckung wird nach der Kartierung von Kovanda et al. (1960) durch sandige Lehme und lehmige Sande mit einer Mächtigkeit von 0,5-4 Metern repräsentiert. In dieser Zone sind die Wasserstollen in der Regel mit Ziegel- oder Steingewölben verstärkt, oder die Decke mit Stein- oder Betonplatten abgedeckt. Es ist möglich, dass einige dieser Stollen auch eine Funktion zur Entwässerung von Feuchtgebieten hatten.

Tabelle 4. Von Karban et al. 2008-2012 dokumentierte Wassersammelstellen in der Region Aš.

Nr.	Bezeichnung	Gesamtlänge	Katastralgebiet	Quartäre Bedeckung	Grundgebirge
1	Aš-Skřivánčí vrch	175 m + Nebenstollen	Aš	sandige Lehme 2-4 m	Paragneis
2	Aš-Mokřiny	78 m	Mokřiny	sandige Lehme 2-4 m	Paragneis
3	Mokřiny-státní hranice	unbekannt	Aš	sandige Lehme 2-4 m	Orthogneis
4	Verněřov	ca. 22 m	Verněřov	sandige Lehme 2-4 m	Orthogneis
5	Dolní Paseky 1	ca. 24 m	Dolní Paseky	lehmige Sande 0,5-2 m	Quarzitischer Glimmerschiefer
6	Dolní Paseky 2	unbekannt	Dolní Paseky	lehmige Sande 0,5-2 m	Quarzitischer Glimmerschiefer
7	Podhradí	unbekannt	Podhradí u Aše	lehmige Sande 0,5-2 m	Meta-Grauwacke
8	Štítary	185 m	Štítary u Krásné	sandige Lehme 2-4 m	Meta-Grauwacke /Quarzit



Legende

- ◆ Qanate dokumentiert 2008-2012
- Störungen
- Quartär:
 - alluviale Anschwemmungen
 - Hanglehme
- Tertiär:
 - 189 Nephelin-Basanit
- Sächsisch-vogtländisches Paläozoikum:
 - 1383 Chlorit-Sericit-Phyllit
 - 1384 Chlorit-Sericit-Phyllit mit Albit
 - 1387 Quarzit bis quarzitischer Phyllit
- Fichtelgebirgs-Kristallin
 - 1432 Biotit-Chlorit-Muskovit-Meta-Grauwacke
 - 1434 quarzitischer Glimmerschiefer
 - 1436 quarzitischer Glimmerschiefer bis Quarzit, oft Granat-führend
 - 1422-1426 Zweiglimmer-Glimmerschiefer
 - 1445-1458 Biotit- bis Zweiglimmer-Paragneis
 - 1485 Orthogneis fein- bis mittelkörnig
 - 1473 Orthogneis mittel- bis grobkörnig
- Erzgebirgspluton:
 - 1553 Biotit-Granit, mittel- bis grobkörnig, porphyrisch
 - 1638 Biotit-Muskovit-Granit mittelkörnig
 - 1594 Pfahlquarz
- 1464 Erlan (Kalksilikat-Hornstein)

Abb. 40. Geologische Karte des Gebiets mit Wasserstellen, dokumentiert von der Gruppe von B. Karban in den Jahren 2008-2012. Geologie nach <https://mapy.geology.cz>.



Abb. 41. Links: Profil des östlichen Stollens Aš-Skřivánčí vrch (2012). Rechts: Anfangsabschnitt des Stollens Podhradí mit Steinauskleidung (2009). Fotos: B. Karban, vollständige Dokumentation im Anhang.

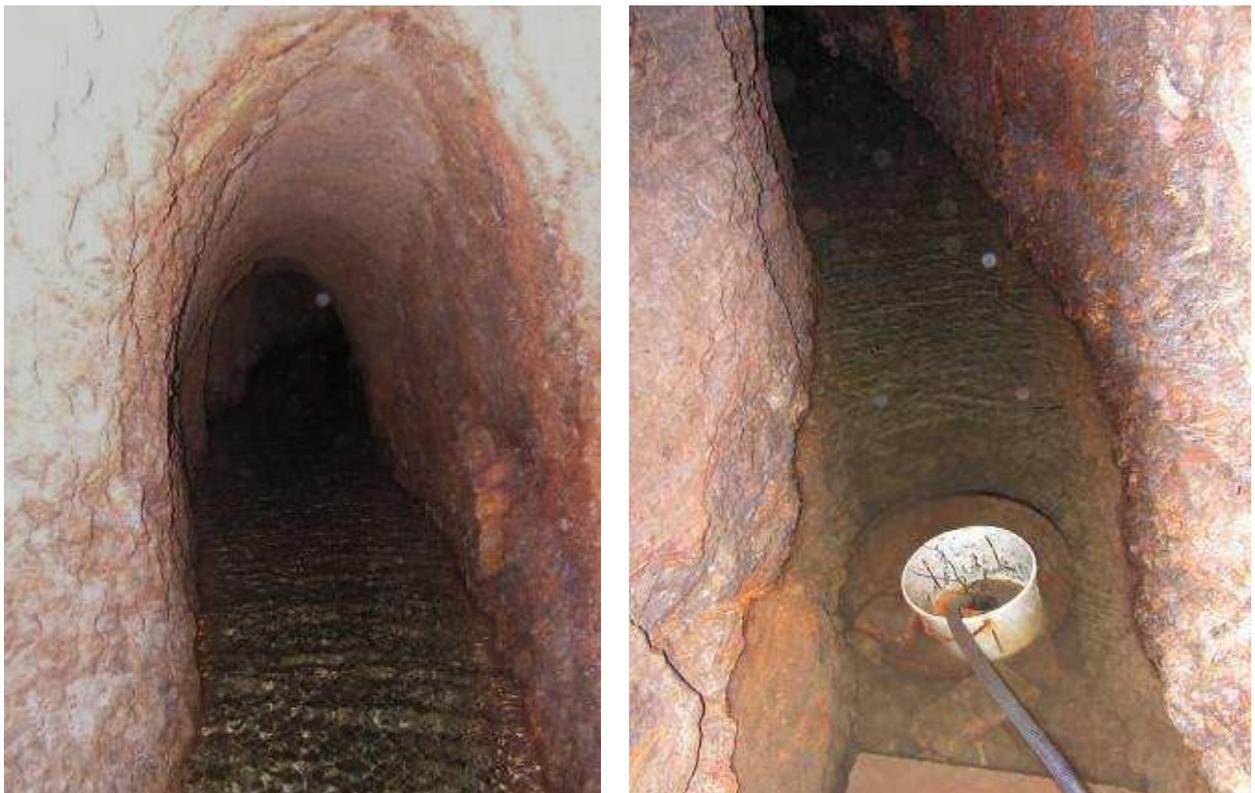


Abb. 42. Dolní Paseky Nr. 1 (2009). Links: Querschnitt des Stollens. Rechts: Wasserentnahme. Foto: B. Karban, vollständige Dokumentation im Anhang.



Abb. 43. Links: Entwässerungsrinne im Stollen Aš-Skřivánčí vrch (2012). Rechts: Eisenrohrleitung auf dem Sohle des Aš-Mokřiny-Stollens (2012). Fotos: B. Karban, vollständige Dokumentation im Anhang.

Erforschung von D. R. Lightfoot (2018-)

Professor Dr. Dale R. Lightfoot (Department of Geography, Oklahoma State University, Stillwater, USA) untersucht derzeit Wassergewinnungsstollen der bayerisch-böhmischen Grenzregion im Rahmen einer weltweit orientierten Studie zu Qanaten. Prof. Lightfoot wurde hierzu im Oktober 2018 durch Mitarbeiter des Geoparks betreut (Dr. A. Peterek, J. Loskot). Unterstützt wurde er weiterhin durch den Stadtarchivar Dieter Arzberger (Selb) und die Kuratorin der völkerkundlichen Sammlung des Museums in Aš (Mgr. Jana Kočíšová). Hierbei konnten die Mitarbeiter des Geoparks gute Einblicke in die Wirkungsweise von Qanaten und auch zu Unterschieden zwischen den Wasserstollen im Grenzgebiet und den klassischen Qanaten erhalten. Prof. Lightfoot listet in der Region mehr als 150 Objekte auf, die für die Wasserversorgung gebaut wurden, davon 79 in Bayern, hauptsächlich um Selb und Rehau, und 73 in Böhmen, hauptsächlich um Aš. Die Ergebnisse der Forschung werden voraussichtlich im Jahr 2022 veröffentlicht (Lightfoot, persönliche Mitt. 2021).

4.3 Weitere Objekte im Gebiet des Geoparks

Im Geopark Egeria sind weitere Objekte bekannt, die den Charakter von Wassersammelstollen haben, da sie mit ähnlicher Technik erbaut wurden. Es wurde jedoch noch keine systematische Studie durchgeführt, um die vermeintlichen unterirdischen Wasserwerke in allen Fällen sicher von Bergwerks-Stollen abzugrenzen. Häufig wurden die ursprünglichen Erkundungs- oder Entwässerungsstollen der Bergwerke später auch als Trink- und Brauchwasserquellen genutzt. Ähnliche Beispiele sind aus der jüngeren Geschichte bekannt. So wird beispielsweise der Erkundungsstollen Vykmanov, der in den 1980er Jahren zur Erkundung der Fluorit-Baryt-Lagerstätte Kovářská in der Ústí-Region angelegt wurde, heute als Trinkwasserquelle für die Gemeinde Perštejn genutzt. In Pernink, bereits im Gebiet des Geoparks, befindet sich ein Wasserreservoir am Stollenausgang eines historischen Zinnstollens, und in Horní Luby wird Wasser aus dem Stollen der ehemaligen Zinnoberminen entnommen.

Die Stollen, die an Stellen vorgetrieben wurden, an denen keine Vererzung auftritt oder zu erwarten ist, können als reine Wasserwirtschaftswerke betrachtet werden. Aber auch dies ist nicht eindeutig, denn auch in der Vergangenheit wurden Bergwerke aus rein spekulativen Gründen errichtet oder Bergleute oder Investoren waren vom Erfolg einfach überzeugt.

Eine detaillierte Dokumentation der Grubenbaue selbst und der Überreste der umgebenden Oberflächenstrukturen sowie historische Daten können in manchen Fällen Aufschluss über den ursprünglichen Zweck der Anlage eines Stollens geben. So lässt sich oft zeigen, dass die Wassergewinnungsstollen hauptsächlich im oberen Bereich der oberflächennahen Verwitterung und an der Basis der quartären Überdeckung angelegt wurden, während die Bergwerksstollen tief in das Festgestein eingeschnitten sind.

Ein Beispiel für einen Stollen, der aus einem noch nicht ganz geklärten Grund angelegt wurde, ist der nachfolgend beschriebene Stollen der Weißen Dame (Föllerberghöhle).

Tatrovice - der Stollen „Weiße Dame“ (Štola Bílá paní; Föllerberghöhle)

Klaubert (1967) erwähnt in seiner Arbeit über die Qanate in der Umgebung von Selb und Aš die so genannte Föllerberghöhle, einen 300 m langen Stollen mit einem seitlichen Abzweig am Fuße des Föllerbergs (616 m) oberhalb von Vřesová (Doglasgrün). Laut Strunz & Redelbach (1989) besuchten Klaubert und sein Assistent Hammerschmidt die Lokalität im Jahr 1967 und machten 22 Schwarz-Weiß-Fotos. Klaubert veröffentlichte einen Bericht in der Juni-Ausgabe 1967 des Elbogener Heimatbriefs. Hier gibt er die Höhe der Eingangsöffnung mit 60 cm und die Breite mit 75 cm an. Das im Stollen zurückgehaltene Wasser floss durch ein Rohr ab und dann durch den Bach zum Teich in die sogenannte „Große Wiese“, und von dort in den Chodaubach (Strunz & Redelbach 1989).

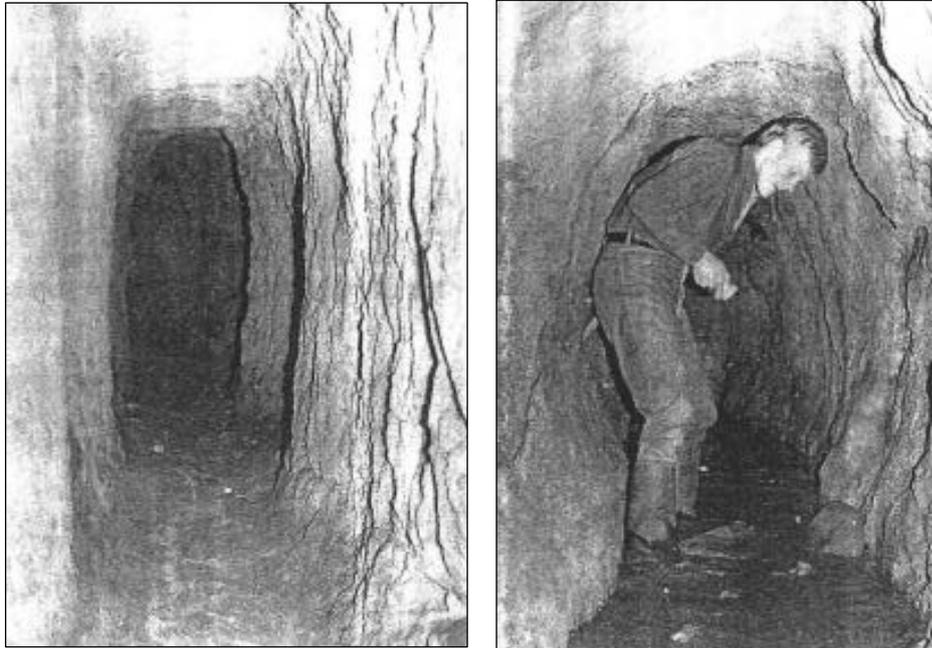


Abb. 44. Föllnerberghöhle auf den Aufnahmen von Helmut Klaubert aus dem Jahre 1967 (aus Strunz & Redelbach 1989).

In den Jahren 2015-2016 wurde das Mundloch des Stollens von dem Bergbauverein „Solles Chodov“ restauriert. Den Informationen auf der Website (www.solles.cz) zufolge heißt der Stollen „Weiße Dame“ und wird als ein Erkundungswerk aus dem 18. Jahrhundert interpretiert, der einer Quarzader folgte und später als Keller oder Wasserspeicher genutzt wurde. Der Eingangsbereich, der durch Geröllschutt verläuft und etwa 10 m lang ist, ist aus Steinen trocken gemauert, die Decke aus Steinplatten gefertigt. In der Verlängerung nach dem Eingang in das Granitmassiv ist ein Nebengang in Richtung Nordosten vorgetrieben, vermutlich einer Quarzader folgend. Er ist etwa 6 m lang, mit Wasser geflutet und an seinem Ende entspringt eine Quelle. Der Hauptstollen, der weniger als 30 Meter lang ist, verläuft in einem Bogen nach SW. Die maximale Höhe des Stollens beträgt etwa 170 cm, die Breite 80 cm. Die sogenannte „Froschquelle“ („Žabí pramen“; <https://www.estudanky.eu/96-studanka-zabi-pramen>), die nur wenige Meter entfernt ist, scheint mit dem Stollen in Verbindung zu stehen.

Der gewölbte Grundriss des Stollens deutet darauf hin, dass der Hauptzweck des Stollens nicht darin bestand, der Quarzader zu folgen, sondern den Grundwasserleiter im oberflächennah verwitterten Granit zu erfassen.



Abb. 45. Wiederherstellung des Mundlochs des Stollens „Weiße Dame“ („Bílá paní“) 2015-2016 (www.solles.cz).



Abb. 46. Aktueller Stand des Standorts im März 2021 ([Kubbykubajz na mapy.cz](http://Kubbykubajz.na.mapy.cz)).



Abb. 47. Der Stollen „Weiße Dame“ („Bílá paní“) bei Tatrovice. Oben: Zugangsbereich mit Steinmauerwerk und einer Decke aus Steinplatten. Mitte: Seitenstrecke mit Grundwasserquelle. Unten: Hauptstrecke (aus dem Video www.solles.cz auf youtube.com).

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Unterirdische horizontale Wasserwirtschaftswerke (Wassersammel- oder Wassergewinnungsstollen) wurden von den Hochkulturen schon weit vor der Antike geschaffen. Viele haben bis heute überlebt, und viele sind noch voll funktionsfähig. Je nach ihrem Zweck kann man grob zwischen Wassersammel-Qanaten, die Wasser aus unterirdischen Grundwasserleitern holen, und Aquädukten unterscheiden, die Wasser aus Oberflächengewässern, Quellen und Reservoirs leiten und nur in Ausnahmefällen Brunnen und Grundwasserleiter nutzen (Schram 2013).

Die klassische Qanattechnik ist vor allem in Gebieten mit folgenden Charakteristiken verbreitet (z. B. <https://www.cleanrivertrust.co.uk/qanat/>, Angelakis et al. 2017):

- Fehlen größerer Flussläufe mit ganzjährig ausreichenden Wassermengen für die Bewässerung;
- das Vorhandensein von potenziell fruchtbaren Gebieten in der Nähe von niederschlagsreichen Gebirgen;
- ein trockenes Klima mit hoher Oberflächenverdunstung, in dem hohe Wasserverluste in Oberflächenkanälen und Stauseen auftreten;
- die große Tiefe der Grundwasserleiter in einem potenziell fruchtbaren Gebiet, das für flache Schürfburgen unerreichbar ist.

Es ist offensichtlich, dass das bayerisch-böhmische Grenzgebiet keines dieser Kriterien erfüllt. Daher ist die Verwendung des Begriffs "Qanat" für die Wasserstollen in dieser Region eher bildlich. Neben den klimatischen Bedingungen ist vor allem die Größe dieser Objekte, die bei herkömmlichen Qanaten im Bereich von Hunderten von Metern bis zu Dutzenden von Kilometern liegt, im Vergleich zu Dutzenden bis Hunderten von Metern bei den Stollen in unserer Region, unzureichend. Der Begriff "Qanat" ist daher eher im übertragenen Sinne als eine Art technischer Lösung zu verstehen, d.h. als ein unterirdischer Wassergewinnungs- und Wassersammelstollen mit vertikalen (Licht-)Schächten (sofern vorhanden). Die Schächte dienen in erster Linie dem Bau der Stollen (gleichzeitiger Vortrieb über mehrere Schächte in jeweils zwei Richtungen, geringere Transportwege für den Abraum).

Im bayerisch-böhmischen Grenzgebiet wurde mit diesen Systemen Grundwasser meist aus der oberflächennahen und wasserdurchlässigen Zone des Fichtelgebirgs-Kristallins entnommen, das hier regional den wichtigsten Grundwasserleiter darstellt. Das Grundwasser fließt in einem gemischten Poren- und Kluftmilieu und in der Tiefe ausschließlich im Kluftmilieu. Die Mächtigkeit des Grundwasserleiters schwankt zwischen einigen Metern und mehreren Dutzend Metern. Die Durchlässigkeit des Grundwasserleiters hängt von der petrographischen Zusammensetzung, der morphologischen Lage und der Intensität der tektonischen Einwirkung sowie der Verwitterung auf die Gesteine ab (Olmer et al. 1990).

Einer der Gründe für den relativ kostspieligen Bau von Wassergewinnungsstollen war deren hohe Ergiebigkeit, die für die Versorgung von Menschen, Haustieren und landwirtschaftlichen Flächen optimal ausreicht, und die Speicherung des Wassers in Behältern ohne die Notwendigkeit des Pumpens. Eine mögliche zusätzliche Funktion dieser Strukturen kann in einigen Fällen die Drainage von feuchten Wirtschaftsflächen sein. Ein Vorteil der Wassergewinnung durch Stollen war auch, dass das Wasser weitgehend unbeeinflusst von Vorgängen an der Erdoberfläche zur Entnahmestelle fließen konnte (vgl. bewusste Vergiftung

von Schachtbrunnen durch Kadaver, weitgehend unbeeinflusst von saisonalen Temperatur- und möglicherweise auch von Niederschlagsschwankungen; außer in extremen Trockenzeiten). Das Einziehen von Staumauern in den Stollen konnte zudem die Verfügbarkeit von größeren Wassermengen unter weitgehend hygienischen Bedingungen sichern.

Das Thema der Qanate bzw. der Wassergewinnungsstollen ist so interessant, dass es angemessen ist, es stärker öffentlich zu machen. Die folgenden Aktivitäten können u.a. vorgeschlagen werden:

- ein kombinierter Präsenz- und Online-Workshop, vorzugsweise mit internationaler Beteiligung (bayerischer Teil des Geoparks, Stadtmuseum Aš, Prof. Lightfoot, u.a. Teilnehmer/innen; diverse Arbeitskreise aus Niederbayern/Oberösterreich);
- Vortrag über den Stand der Kenntnisse;
- Veröffentlichung auf der Website des Geoparks und in den sozialen Medien;
- Installation von Informationselementen im Gelände, beispielsweise Informationstafeln oder über QR-Codes; ein möglicher Vorschlag für einen Naturlehrpfad ist in Abb. 48 dargestellt; möglich wäre auch eine Erweiterung der Informationstafel am Stollen „Weiße Dame“ („Bílá paní“);
- eventuell auch weitere Aktionen in Absprache mit den Geoparkpartnern.

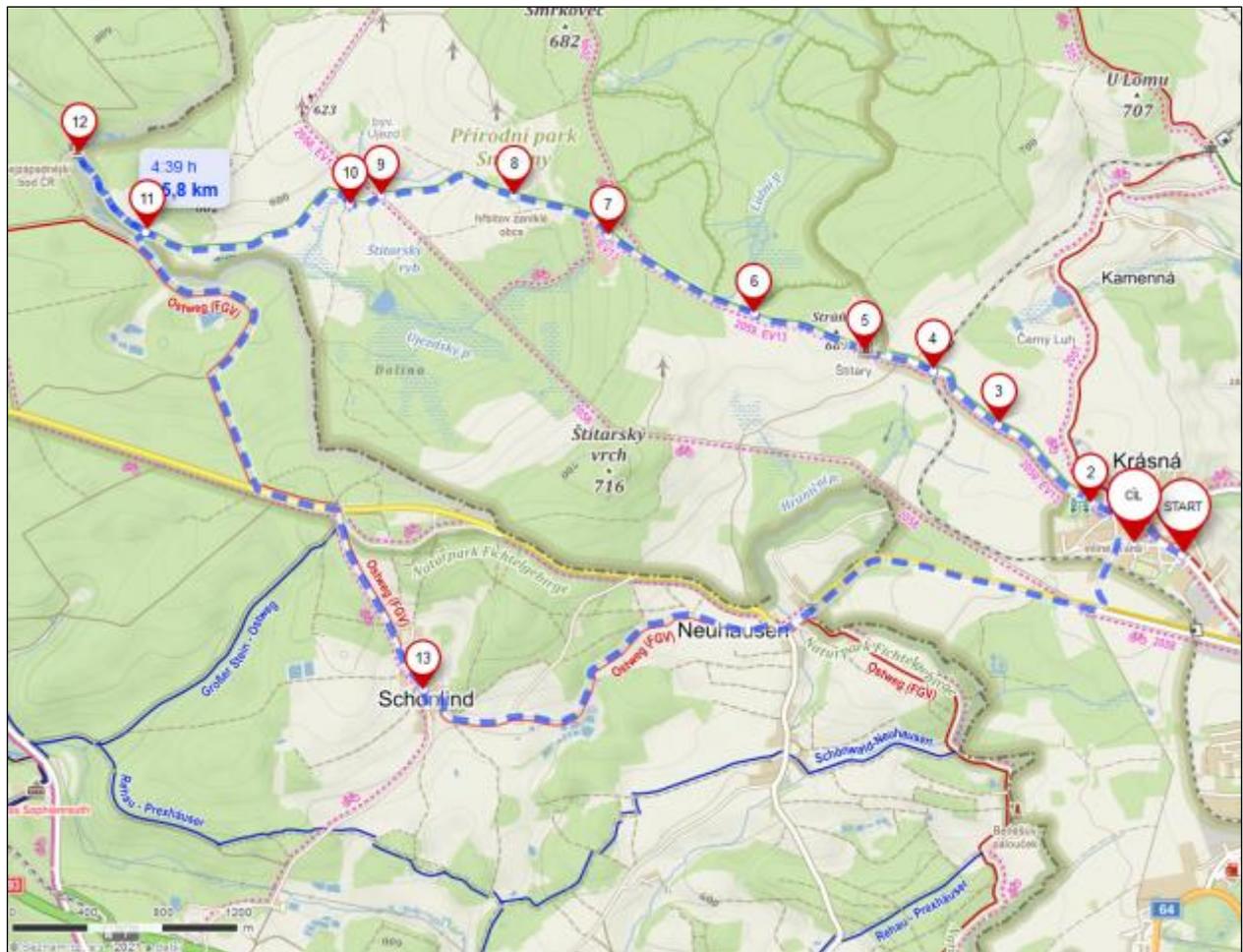


Abb. 48. Mögliche Route eines grenzüberschreitenden Naturlehrpfads "Von Krásná bis zum Ende der Republik": 1 - Start Gemeindeamt, 2 - Kinderseilpark, 3 - Stall Štítary, 4 - Bahnhof, 5 – Unterirdisch/Qanate, 6 - Nationales Naturdenkmal Bystrina-Lužní potok, 7 - Rota, 8 - Friedhof Újezd, 9 - Signalweg, 10 – Weltkriege-Denkmal, 11 - Europabrücke, 12 - Westlichster Punkt der Tschechischen Republik, 13 - Route auf deutscher Seite nach dem Vorschlag des Geoparks Bayern-Böhmen.

7 Literatur

Diese Referenzen sind auf den jeweiligen Webseiten oder im digitalen Archiv des Autors verfügbar.

Abbasnejad A., Abbasnejad B., Derakhshani R., Sarapardeh A. H. (2016): Qanat hazard in Iranian urban areas: explanation and remedies. – *Environ. Earth Sci.* 75, 1306, 14 pp.

Al-Ghafri A., Inoue T., Nagasawa T. (2003): Daudi Aflaj: the Qanats of Oman. Conference paper. - *Proceedings of the Third Symposium on Xinjiang, Uyghor, China*, 29-36.

Angelakis A. N., Chiotis E., Eslamian S., Weingartner H. Eds. (2017): *Underground aqueducts handbook*. CRC Press. 522 s.

Beaumont P., Bonine M. E., McLachlan K. S., McLachlan A. (1989): *Qanat, kariz, and khattara: traditional water systems in the Middle East and North Africa*. - Middle East & North African Studies Press, London.

Bičík I. (1971): *Kanáty v Íránu*. 1. vyd. Academia Praha.

ČSN 75 5115 (2010): *Jímání podzemní vody*. Česká technická norma.

Dahmen A. (2015): Major hydraulic systems in Algeria. In: *Proceedings of the IWA Workshop on Evolution of Qanat and Relevant Hydraulic Technologies*, Yazd, Iran, 141–154.

English P. W. (1968): The Origin and Spread of Qanats in the Old World. - *Proceedings of the American Philosophical Society* 112, 3, 170-181.

Guliyev A.G. (2014): Reports on Ecological Aspects. *Politex*, Baku, Azerbaijan, p. 179. Cit. in Angelakis et al. (2017).

Heinrich H. & Arzberger, D. (2009): *Unterirdisches Selb. Röhrwasser, Felsenkeller und Kanate*. Selber Hefte 21, 369 S., Selb.

Iransafar (2019): Persian Qanat, an Iranian invention. Dostupné online z <https://www.iransafar.co/articles/item/120-persian-qanat>.

Klaubert H. (1967): Qanats in an Area of Bavaria-Bohemia. *Geographical Review* 57, 2, 203–212. Taylor & Francis, Ltd.

Kovanda J. et al. (1960): Zpráva o mapování základových půd na části listu generální mapy 1 : 100 000 M-33-61- Cheb, se zřetelem na listy speciálních map 1 : 25 000 M-33-61-A-a (Újezd), M-33-61-A-b (Hranice), M-33-61-A-c (Štítarský Vrch), M-33-61-A-d (Aš), M-33-61-D-a (Fr. Lázně) a M-33-61-D-b (Tršnice). – ÚÚG Praha (GF P012770).

Kremer B. (2003): Neue Forschungen zum Qanat in Pölich/Mosel sowie eine archäologische Neuentdeckung im Trierer Stadtgebiet – Der Qanat bei St. Matthias. - Internationales Frontinus-Symposium 2003, Walferdange (Luxemburg), 2.-5.Okt. 2003, Walferdange, Luxemburg (= Schriftenreihe der Frontinus-Gesellschaft, H. 26), 127-142. Cit. in Weingartner (2007).

Kučera T. (2006): Projekt VHO: Modul 1, Jímání a úprava vody. Brno.

Lightfoot D. R. (1996): Moroccan khettara: Traditional irrigation and progressive desiccation. – *Geoforum*, 27, 2, 261-273.

- Lightfoot D. R. (1996): Syrian Qanat Romani: History, Ecology, Abandonment. - Journal of Arid Environments 33, 321-336.
- Lightfoot D. R. (1997): Qanats in the Levant: Hydraulic technology at the periphery of early empires. - Technology and Culture, 38, 2, 432-451.
- Lightfoot D. R. (2000): The Origin and Diffusion of Qanats in Arabia: New Evidence from the Northern and Southern Peninsula. - Geographical Journal, 166, 3, 215-226.
- Lightfoot D. R. (2009): Survey of Infiltration Karez in Northern Iraq: History and Current Status of Underground Aqueducts. A report prepared for UNESCO by Dale Lightfoot, Department of Geography, Oklahoma State University. Dostupné z <https://www.researchgate.net/publication/242729587>.
- Lofrano G., Carotenuto M., Maffettone R., Todaro P., Sammataro S., Kalavrouziotis I. K. (2013): Water Collection and Distribution Systems in the Palermo Plain during the Middle Ages. - Water, 5, 1662-1676.
- mapy.geology.cz: /Administrativní jednotky, Hydrogeologické rajony. In: Hydrogeologické rajony [online]. Dostupné z: https://mapy.geology.cz/hydro_rajony/. Geologická mapa 1 : 50 000. In: Geovědní mapy 1 : 50 000 [online]. Praha: Česká geologická služba [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: <https://mapy.geology.cz/geocr50/>
- Olmer M., Kessler J. et al. (1990): Hydrogeologické rajóny. - Práce a studie 176, Výzkumný ústav vodohospodářský Praha-Podbaba.
- Raghubans K. (2015): Qanat system at Bidar District in Karnataka, India. Hydro Nepal. - Journal of Water, Energy and Environment 17, 18–23.
- Schram W. D. (2013): Persian qanats and Roman aqueducts. A short explanation and a comparison. - Powerpointová prezentace <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=Schram+W.+D.+%282013%29%3A+Persian+qanats+and+Roman+aqueducts>.
- Strunz A., Redelbach K. (1989): Die Föllnerberghöhle. - In: Pechgrün im Bezirk Elbogen - ein verschüttetes Dorf, 78-81. Selb/Struttgart.
- Šrámek O. (2017): Perské kanáty a klimatická změna. - Vesmír 2017/7, 96, 410.
- TAČR (2021): Regionální surovinová politika Karlovarského kraje. Modelový dokument zpracovaný v rámci projektu TITSMPO909 Metodika a tvorba standardů tvorby a periodické aktualizace regionálních surovinových koncepcí, modelové řešení dvou zvolených regionů. – MS ČGS a GET. MPO Praha.
- Taghavi-Jeloudar M., Han M., Davoudi M., Kim M. (2013): Review of Ancient Wisdom of Qanat, and Suggestions for Future Water Management. - Environmental Engineering Research 18, 2, 57-63.
- Tamuri J. (2007): Karez: Afghanistan's Traditional Irrigation System. - The Alternative Development Knowledge Network. Dostupné z <https://web.archive.org/web/20090307202938/http://www.adkn.org/EN/agriculture/article.asp?a=67>.
- thonbrunn (2021): Horizontální vodní štoly na Ašsku. Dostupné z http://www.thonbrunn.cz/stranky/studny_cz.php.

- Todaro P., Todaro A., Sammatano A. (2006): Progetto per la valorizzazione e fruizione turistica del qanat Uscibene e della "camera di scirocco" di Villa Savagnone a Palermo (Italy). – Geologia dei Beni Culturali e Ambientali.
- Veselský J. (2018) Voda v kulturách starého Peru. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, 60, 2, 49–53. Dostupné z <https://www.vtei.cz/2018/04/voda-v-kulturach-stareho-peru/>.
- VUT (2015): Vodohospodářské stavby. Modul 02. Zdravotně technické stavby. - Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně. 64 s.
- Weingartner H. (2007): Water supply by qanats. A contribution to water shortage in Mediterranean areas? - Proceedings of the 10th International Conference on Environmental Science and Technology Kos island, Greece, 5 – 7 September 2007, 1555-1561.
- Wilson A. I. (2008): Hydraulics engineering and water supply. - In Oxford Handbook of Engineering and Technology in the Classical World, ed. J. P. Oleson, Oxford University Press, Oxford, UK, pp. 285–318.
- Wulff H. E. (1968): The Qanats of Iran. - Scientific American 218, 94-105. Cit. in Taghavi-Jeloudar et al. (2013).

Webseiten:

www.adkn.org	www.vtei.cz
www.atlasobscura.com	www.youtube.com
www.cleanriverstrust.co.uk	
www.czwiki.cz	
www.deccanheritagefoundation.uk	
www.dekapolis-aquaedukt.de	
www.estudanky.eu	
www.geology.cz	
www.google.com	
www.heis.vuv.cz	
www.hlubinnevrtty.cz	
www.chinatoday.com.cn	
www.iransafar.co	
www.persiaadvisor.travel	
www.pospisil-ro.cz	
www.researchgate.net	
www.romanaqueducts.info	
www.solles.cz	
www.vodarenstvi.cz	

Anhang

Ergebnisse der Untersuchung der horizontalen Wasserstollen bei Aš (übernommen von www.thonbrunn.cz)

Inhalt

1. Aš-Skřivánčí vrch
2. Aš-Mokřiny
3. Mokřiny - státní hranice
4. Vernéřov
5. Dolní Paseky 1 a 2
6. Podhradí
7. Štítary