

Geologisch-hydrogeologische Einflussfaktoren bei der Trassenwahl von Tunnelbauwerken am Beispiel der binationalen Andentunnel

Dissertation

zur Erlangung des Grades

Doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)

am Fachbereich Geowissenschaften der Freien Universität Berlin

vorgelegt von

Claudio Giorgio Höfer-Öllinger, Mag.rer.nat., Akademischer NATM-
Ingenieur

Berlin, 2016

Erstgutachter:

Prof. Dr. Michael Schneider
Freie Universität Berlin
Fachbereich Geowissenschaften
Institut für Geologische Wissenschaften
Arbeitsgruppe Hydrogeologie
Malteserstr. 74-100, 12249 Berlin

Zweitgutachter:

Prof. Dr. Wilhelm Coldewey
Westfälische Wilhelms-Universität Münster
Institut für Geologie und Paläontologie
Corrensstr. 24, 48149 Münster

Tag der Disputation: 07.02.2017

Inhalt

VERZEICHNIS DER TABELLEN.....	III
VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN.....	IV
VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN	IX
VERZEICHNIS DER FORMELZEICHEN UND EINHEITEN	X
ZUSAMMENFASSUNG	XI
1 EINFÜHRUNG UND AUFGABENSTELLUNG.....	1
2 GEOGRAPHIE UND GEOLOGIE DER UNTERSUCHUNGSGEBIETE	4
2.1 Geographischer Überblick	4
2.2 Regionale Geologie	4
3 THEORETISCHE GRUNDLAGEN	7
3.1 Geologie im Zuge der Tunnelplanung.....	7
3.2 Hydrogeologie im Zuge der Tunnelplanung	7
3.3 Hydrogeologie von Hochgebirgsregionen	11
3.4 Hydrogeologie der Festgesteine.....	12
3.5 Isotopenhydrologie	13
3.6 Geothermie	16
4 AGUA NEGRA BASISTUNNEL	19
4.1 Vorhaben.....	19
4.2 Geologisches Modell	21
4.3 Hydrogeologie	37
4.4 Wasser-Zutrittsprognose	44
4.5 Geothermie	51
4.6 Trassenwahl des Tunnels.....	53
5 BASISTUNNEL DES CORREDOR BIOCEÁNICO ACONCAGUA	61
5.1 Vorhaben.....	61
5.2 Geologisches Modell	61
5.3 Hydrogeologie	74
5.4 Geothermie	91
5.5 Trassenvarianten des Tunnels	95
6 DISKUSSION	100
6.1 Geologisch-hydrogeologische Einflussfaktoren bei der Trassenfindung.....	100
6.2 Besonderheiten tiefliegender Tunnel	103
6.3 Besonderheiten bei Tunnelvorhaben in den Anden	106
6.4 Empfehlung für die weitere Vorgangsweise beim Agua Negra Tunnel	107

6.5 Empfehlungen zur weiteren Vorgangsweise beim Basistunnel des Corredor Bioceánico Aconcagua	108
6.6 Neue Erkenntnisse	111
6.7 Expertensystem für die hydrogeologische Prognose tiefliegender Tunnel	112
6.8 Ausblick	122
7 QUELLENVERZEICHNIS	123
7.1 Literatur	123
7.2 Unveröffentlichte Quellen	132

VERZEICHNIS DER TABELLEN

Tabelle 01	Die wesentlichen Eckdaten des Agua Negra Tunnels.....	19
Tabelle 02	Die wichtigsten Gesteinsarten der Choiyoi Gruppe, die für den Agua Negra Tunnel definiert wurden.	34
Tabelle 03	Zusammenfassung der Pumpversuchsergebnisse, die im Portalbereich in Chile in den Bohrungen S01a und S10 durchgeführt wurden.....	46
Tabelle 04	Die wesentlichen Eckdaten des CBA Basistunnels.....	61
Tabelle 05	Evapotranspiration im Projektgebiet (berechnet nach TURC, 1961).	75
Tabelle 06	Schätzung von Oberflächenabfluss und Grundwasserneubildung.	75
Tabelle 07	Resultate der Isotopenuntersuchungen an den Quellen 16 „Puente del Inca“ sowie an einer Referenzmessstelle auf der gegenüber liegenden Talseite.	77
Tabelle 08	Geothermometer des Siliziums, nach MARINI 2000.....	92
Tabelle 09	Auf Ionen basierende geothermometrische Lösungen nach MARINI 2000.....	93
Tabelle 10	Legende der Flussdiagramme im Expertensystem.	113

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

Abbildung 01.	Lage der – derzeit vier – in Planung (Agua Negra, Cristo Redentor, Las Leñas) bzw. in Bau (Pascua Lama) befindlichen binationalen Andentunnel.....	2
Abbildung 02.	Tektonische Gliederung der südlichen Zentralanden, nach ALVAREZ & RAMOS (1999), RAMOS (2000) sowie RAMOS et al. (2004).	5
Abbildung 03.	Die nach BURKE et al. (1982) sekuläre Kurve für Änderungen des $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - Verhältnisses während des Phanerozoikums auf Basis von Analysen mariner Karbonate, Evaporite und Fossilien. Die Zahlen auf der x-Achse stehen für Millionen Jahre. Aus: BANNER (2004).	15
Abbildung 04.	Wärmeflusskarte von Südamerika (UYEDA & WATANABE, 1982), mit Lage der Projekte Agua Negra Tunnel im Norden und Corredor Bioceánico Central (aus: HÖFER-ÖLLINGER & MILLEN, 2010).	18
Abbildung 05.	Thermische Leitfähigkeit der Gesteine der Formation Choyoi (aus: HÖFER-ÖLLINGER & MILLEN, 2010).	18
Abbildung 06.	Luftbildaufnahme und Lageplan des geplanten Tunnels. Dargestellt sind die internationale Grenze und die bestehende Passstraße.....	20
Abbildung 07.	Schematische Skizze mit den wichtigsten geometrischen Eckdaten.....	20
Abbildung 08.	Schematische Skizze des ANDES Labors. Die zwei unteren Röhren stellen die Haupttunnelröhren des Agua Negra Tunnels schematisch dar. Aus: BERTOU, 2011.	21
Abbildung 09.	Hangrutschung westlich des Agua Negra Passes, rote Markierung: Rutschung, blaue Markierung: Lage der Quellen. Blickrichtung Ost.....	24
Abbildung 10.	Situation am Olivares Westhang: Relikte einer einstigen Aufschiebung sind erkennbar.	27
Abbildung 11.	Südhang des Cerro Sarmiento mit vermuteter Überschiebung.	28
Abbildung 12.	Paläostressanalyse auf Basis von Bewegungsindikatoren (Auswertung von Messungen von Striemung an Harnischflächen, aus SCHMID et al., 2012).	29
Abbildung 13.	Verhältnis zwischen der Raten der Spreizung des Ozeanbodens und der orogenen Phasen der Anden (verändert aus FRUTOS, 1981).	30
Abbildung 14.	Schematische Skizze der Situation am Olivares Westhang (BRÜCKNER, 2010). Core zone: Kernzone; damage zone: Zerrüttungszone. S1 steht für S1a, die Lage der Bohrungen ist in Abbildung 20 dargestellt.	31
Abbildung 15.	Abschiebung am Ende der San Lorenzo Störung. Blickrichtung West.	32
Abbildung 16.	Gesteine der Choyoi Gruppe. Kombination von Lithologie und Auswurfs- bzw. Ablagerungsbedingungen. Aus: HÖFER-ÖLLINGER et al. (2010).....	33

Abbildung 17. Vereinfachte geologische Karte des Agua Negra Tunnels, dargestellt im Maßstab 1:50.000 (vorhergende Seite). Die Karte zeigt an der Oberfläche vorwiegend Andesite im Osten und Rhyolite im Westen des geplanten Tunnels. Die Gesteine der tertiären Formation Doña Ana wurden nicht gesondert ausgewiesen. Zusammengestellt, ergänzt und kompiliert aus HÖFER-ÖLLINGER, 2008, HÖFER-ÖLLINGER et al. 2010 sowie BUREAU DE PROYECTOS E CONSULTORÍA LTDA. 2012.....	36
Abbildung 18. Vereinfachter und schematisierter geologischer Längenschnitt des Agua Negra Tunnels, ohne Maßstab, verändert aus: HÖFER-ÖLLINGER & MILLEN, 2010.	36
Abbildung 19. Lage der aufgenommenen Quellen beim Projekt Agua Negra Tunnel; pH-Wert (oben) und elektrische Leitfähigkeit.....	38
Abbildung 20. Lage der Bohrungen für den Agua Negra Tunnel.	39
Abbildung 21. Ca+Mg-Gehalte gegen HCO ₃ -Gehalt der Wasserproben aus den Bohrungen (grüne Quadrate mit gelben Kreuzen) und Quellen/Bäche (braune Quadrate mit türkisfarbigen Kreuzen).	41
Abbildung 22. Ca- gegen SO ₄ -Gehalt der Wasserproben aus den Bohrungen (grüne Quadrate mit gelben Kreuzen) und Quellen/Bächen (braune Quadrate mit türkisfarbigen Kreuzen).	42
Abbildung 23. Lage der Isotopen-Messstellen am Agua Negra Pass und Werte einer Stichtagsmessung vom Februar 2010, verändert aus HÖFER-ÖLLINGER (2011).	43
Abbildung 24. Höhenabhängigkeit von stabilen Isotopen in verschiedenen Breitengraden. Verändert, aus HÖFER-ÖLLINGER & MILLEN (2013).	44
Abbildung 25. Graphische Darstellung der vereinfachten Parameter des Agua Negra Tunnels, die Basis für die weiteren Berechnungen sind.....	47
Abbildung 26. Vortrieb, unter Annahme unterschiedlicher Vortriebsgeschwindigkeiten zwischen 320 und 1920 m/a in Abhängigkeit geotechnischer Voraussetzungen.....	47
Abbildung 27. Wasserzutritt während Vortrieb, unter Annahme unterschiedlicher Vortriebsgeschwindigkeiten zwischen 320 und 1920 m/a in Abhängigkeit geotechnischer Gegebenheiten.	48
Abbildung 28. Verteilung der Zutrittsmengen in l/s/10m am letzten Vortriebstag.	49
Abbildung 29. Abklingen des zutretenden Bergwassers nach Fertigstellung der Tunnelröhre. Nach Vortriebsende ändert sich im Diagramm die Skalierung von 10-Tages- auf Jahresschritte.	49
Abbildung 30. Temperaturverlauf ausgewählter Bohrungen für den Agua Negra Tunnel. Man beachte den Unterschied der Gruppe S01, S10 in Chile im Vergleich zu den anderen Bohrungen in Argentinien (HÖFER-ÖLLINGER & MILLEN, 2010).....	51
Abbildung 31. Temperaturprognose für den Agua Negra Tunnel (verändert aus: HÖFER & MILLEN, 2010). ASL = Seehöhe.....	52
Abbildung 32. Die zwei finalen Varianten „A1“ (rot) und „S2B“ (grün) aus der Studie CONSULBAIRES & INGENDESA, (2004), die bei Beginn der gegenständlichen Bearbeitung zugrunde lagen.	53

Abbildung 33.	Lage der beschriebenen Massenbewegungen.....	54
Abbildung 34.	Muschelförmige Anbrüche oberhalb des Ostportals können auf tiefreichende Sackungen oder auch auf oberflächennahe Rutschungen hinweisen – hier dürfte es sich um Rutschungen handeln.	55
Abbildung 35.	Bereiche mit vorwiegend argillischer hydrothermaler Alteration.	56
Abbildung 36.	Strukturen des Untersuchungsgebiets (rote Lineamente), Legende wie Abbildung 35. 1 = San Lorenzo System, 2 = Río Colorado System, 3 = Olivares Störung, 4 = Agua Negra Störung.	57
Abbildung 37.	Perspektivische Ansicht mittels „Google Earth“, Blickrichtung Ost in Richtung Argentinien (oben) und Bodenansicht. Die rote Linie zeigt vereinfacht die Ostgrenze der Río Colorado Störung an der Westflanke des Cerro Olivares, die gelbe die internationale Grenze.	59
Abbildung 38.	Finale Trasse, wie sie für die weitere Bearbeitung verfolgt wurde, aus: BÖFER & HÖFER-ÖLLINGER, 2012.....	60
Abbildung 39.	Interpretative Rekonstruktion der Anden bei 32°40' S (Aconcagua), vertikal überhöht. MAO = Main Andean Overthrust (aus: VICENTE, 1993). Der blaue Rahmen zeigt das Detail in Abbildung 40.	62
Abbildung 40.	Der thin-skinned Aconcagua Thrust Fold Belt (ATFB), aus: RAMOS et al. (1996, 2004). Die Formation Alto Tupungato wird dem Karbon zugeordnet, die permotriassischen Vulkanite entsprechen der Formation Choiyoi, der jurassische Gips der Formation Auquilco, die jurassischen Sandsteine der Formation Tordillo, die Kalke des Neokomiums der Mendoza Gruppe, die kretazischen Sandsteine den Formationen Cristo Redentor und Diamante, die kretazischen Vulkanite der Formation Juncal und die känozoischen Ablagerungen der Formation Agua de la Piedra.	62
Abbildung 41.	Hauptüberschiebungen im Bereich südlich des Aconcagua.....	63
Abbildung 42.	Antiklinale Cristo Redentor. In rot gehalten die tektonischen Kontakte (Überschiebung: Dreiecke; Störung: strichlierte rote linie) die die Struktur Richtung Westen und Südosten begrenzen. Die weiss-strichlierte Linie zeichnet die ursprüngliche Form der Antiklinale nach (BÖFER et al. 2008).....	64
Abbildung 43.	Antiklinalstruktur des Cerro Juncal, mit Überschiebung von Westen kommend.	65
Abbildung 44.	Nächste Seite: Geologische und hydrogeologische Karte des Basistunnels, Varianten 5 (rot), 8 (blau) und 10 (schwarz), des Corredor Bioceánico Aconcagua, Maßstab 1:150.000, Stand Juli 2008, verändert aus: BÖFER et al., 2008.	65
Abbildung 45.	Die Grafiken zeigen die Prozentanteile und Konzentrationen der Ionen der beprobten Wässer im Projektgebiet. Das Wasser der Quelle 16 bei Puente del Inca wird als roter Punkt im Piper Diagramm und durch die rosa Linie im oberen Bereich des Schoeller Diagramms hervorgehoben.....	76
Abbildung 46.	Hydrochemische Bereiche 1 bis 6, mit Penitentes Störung im Osten und Quebrada Juncal im Westen.	78

Abbildung 47.	Diagramm Na/Cl: Es zeigt die schematisierte Linie von Lösung/Mischung der aufsteigenden thermalen Wässer des Systems Puente del Inca, welche reich an NaCl sind, mit den anderen Wässern der Quellen im Bereich 1 mit dem Typ Ca-SO ₄	79
Abbildung 48.	Chloridgehalt im Untersuchungsgebiet der Messkampagne Sommer 2008. Die dargestellten Werte entsprechen den vom Labor übermittelten Ergebnissen, Werte unter 10 mg/l wurden mit „0 mg/l“ übermittelt.	79
Abbildung 49.	Natriumgehalt im Untersuchungsgebiet der Messkampagne Sommer 2008.	80
Abbildung 50.	Die Quelle, die Gebäude der Therme und die Brücke “Puente del Inca”.	83
Abbildung 51.	Die Quelle Puente del Inca mit starken Ausgasungen an ihrem Hauptaustritt....	83
Abbildung 52.	Profil/Skizze von RAMOS (1993) und Foto des Gebiets um die Puente del Inca Quelle.	84
Abbildung 53.	Skizze nach MARINI (2000). Die mögliche Herkunft der Thermalquelle von Puente del Inca ist in Rot markiert.....	85
Abbildung 54.	Skizze aus RAMOS (1993), die die mögliche Herkunft der Thermalquelle von Puente del Inca zeigt.	86
Abbildung 55.	Sauerstoff 18 der Quellen 16 und 17, gegenübergestellt den Werten von Agua Negra und Pascua Lama. Die Werte zeigen, dass die Kurve von VOGEL et al. (1975) deutlich abweicht (HÖFER-ÖLLINGER & MILLEN, 2013).....	87
Abbildung 56.	Schwefel 34: Weltweite Abhängigkeit des Schwefel-34 Isotopengehalts zum Zeitpunkt der Ablagerung der sulfatischen Sedimente, aus PAYTAN et al. (2011). Die Werte der Quellen 16 und 18 sind mit der roten Linie dargestellt.....	88
Abbildung 57.	Zusammenhang zwischen den Isotopen $\delta^{34}\text{S}$ (‰ VCDT) sowie $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ unter Berücksichtigung der zwei beprobten Quellen. Es dürfte sich zweifellos um Lösung von mariner Sedimentgesteine evaporitischer oder chemischer Herkunft zu handeln.....	89
Abbildung 58.	Einfache numerische Modellierung des geothermischen Wärmeflusses unter Annahme von drei Gipsdiapieren, die mittelsteil nach West fallen, für den zentralen Abschnitt der Alternative 5. Das Oberflächenrelief wurde berücksichtigt, die Senke (Erdoberfläche) mit 0 beziffert, das geplante Tunnelvorhaben mit der roten Linie gekennzeichnet (HÖFER-ÖLLINGER, 2010).	94
Abbildung 59.	Stark vereinfachter geologischer Schnitt der Alternative 5 des Corredor Bioceánico Aconcagua. Die in violett dargestellten Abfolgen halten sich farblich an die Formation Choiyoi, beinhalten in dieser Abbildung auch die Fomeration Alto Tupungato und die Granite. In grün gehalten, die komplette jurassisch-kretazische Abfolge.	95
Abbildung 60.	Plan und Profil der Alternative 5 des Basistunnels des Corredor Bioceánico Aconcagua (BÖFER, 2008).	96
Abbildung 61.	Plan und Profil der Alternative 8 des Basistunnels des Corredor Bioceánico Aconcagua (BÖFER, 2008).	97
Abbildung 62.	Plan und Profil der Alternative 10 des Basistunnels des Corredor Bioceánico Aconcagua (BÖFER, 2008).	98

- Abbildung i. Piper- (oben) und Schöllerplot (unten), prozentuelle Anteile beziehungsweise Konzentrationen der Ionen in den Wasserproben aus dem Projektgebiet.V
- Abbildung ii. Piper- (oben) und Schöllerplot (unten), prozentuelle Anteile beziehungsweise Konzentrationen der Ionen in den Wasserproben aus dem Projektgebiet (Siehe dazu auch Anhang 2). VII
- Abbildung iii. Piper- (oben) und Schöllerplot (unten) aller untersuchten Wasserproben im Projektgebiet.....VIII

VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN

CBA	Corredor Bioceánico Aconcagua
GMWL	Global Meteoric Water Line
GSA	Gewässerschutzanlage
HFU	Heat Flow Unit
MWL	Meteoric Water Line
NATM	Neue österreichische Tunnelbauweise
s.s.	sensu stricto
SMOW	Standard Mean Ocean Water
TAN	Agua Negra Tunnel
TBM (TVM)	Tunnelbohrmaschine (Tunnelvortriebsmaschine)
VCDT	Vienna Canyon Diablo Troilite
VSMOW	Vienna Standard Mean Ocean Water

VERZEICHNIS DER FORMELZEICHEN UND EINHEITEN

Formelzeichen	Einheit	Größe/Begriff
A	m ² , km ²	Fläche
$c((1/z) \cdot X)$	%meq/l	Moläquivalent eines gelösten Stoffes oder Ions X an der Gesamtkonzentration
d_E	‰	Deuterium Exzess
E_H	1	Redoxpotential
\dot{h}_A	mm/a	Abflussrate
\dot{h}_{AW}	l/(s·km ²)	Abflussspende
\dot{h}_N	mm/a	Niederschlagsrate
k_f	m/s	Durchlässigkeitsbeiwert
L	mm, cm, m, km	Länge, Entfernung, Abstand, Seehöhe
m	mg, g, kg, t	Masse
P	W	Leistung
pH	1	pH-Wert (negativer dekadischer Logarithmus der Wasserstoffionenkonzentration)
q_i	W/m ² , mW/m ²	Wärmestromdichte, (Heat Flow Unit: 1 HFU = 63 mW/m ²)
S	1	Speicherkoeffizient
t	s, min, h, d, a, MA	Zeit
T	K	Absolute Temperatur
θ	°C	Celsius-Temperatur (mit 273,15 K = 0°C)
v	km/h, m/a	Geschwindigkeit
V	m ³	Volumen
V	1	Volumen
z	1	Äquivalentzahl
-	TU	Tritium Units
-	Bq	Radioaktivität
δ ¹⁸ O	‰	Isotopenverhältnis des Sauerstoff 18 zum SMOW (Standard Mean Ocean Water), bzw. zum V-SMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water)
δ ² H	‰	Isotopenverhältnis des Deuterium zum SMOW bzw. V-SMOW
δD	‰	Isotopenverhältnis des Deuterium zum SMOW bzw. V-SMOW
δ ³⁴ S	‰	Isotopenverhältnis des Schwefel 34 zum VCDT (Vienna Canyon Diablo Troilite)
κ	S/m, μS/cm	Elektrische Leitfähigkeit
λ	W/(K·m)	Wärmeleitfähigkeit
λ _{ij}	W/(K·m)	Wärmeleitfähigkeitstensor

ZUSAMMENFASSUNG

Anhand des Beispiels zweier Basistunnel-Bauvorhaben in den Anden zwischen Chile und Argentinien wird die geologisch-hydrogeologische Planung in zwei unterschiedlichen Projektphasen vorgestellt. Darauf aufbauend und unter Einbeziehung von Erkenntnissen von Projekten in den Alpen, im Himalaya sowie anderer Bauvorhaben in den Anden werden konkrete Empfehlungen für die hydrogeologische Planung von tiefliegenden Tunnelvorhaben dargestellt.

Auf Basis von Kartierungen und – bei einem der Vorhaben – von Erkundungsbohrungen werden für beide Vorhaben je ein geologisches und ein hydrogeologisches Modell ausgearbeitet. Das geologische Modell ist in Form einer regionalgeologischen Beschreibung, einer Definition von Gesteins- und Gebirgsarten, einer geologischen Karte und eines Längenschnitts entlang des geplanten Bauwerks dargestellt. Das hydrogeologische Modell besteht aus einem ausformulierten Konzeptmodell und einer hydrogeologischen Prognose.

Die Projekte sind der Agua Negra Tunnel, ein 13,9 km langer Autobahntunnel auf einer durchschnittlichen Seehöhe von 3.850 m zwischen den Provinzen Coquimbo und San Juan, sowie der Basistunnel des Corredor Bioceánico Aconcagua, ein 52 km langer Eisenbahntunnel auf durchschnittlich 2.050 m Seehöhe zwischen den Provinzen Valparaíso und Mendoza.

Die Trassenwahl der Basistunnel erfolgt auf Grundlage geologisch-hydrogeologischer Einflussfaktoren und ist – in Anlehnung an die jeweilige Projektphase – bei einem der Projekte, Agua Negra Tunnel, bereits abgeschlossen, bei dem Zweiten – Corredor Bioceánico Aconcagua – noch offen. Für beide Projekte sind konkrete Empfehlungen aus geologisch-hydrogeologischer Sicht für die jeweils nächste Projektphase dargelegt. Beim Agua Negra Tunnel ist dies die Anlage eines etwa 4,6 km langen Erkundungsstollens auf der chilenischen Seite vor Beginn der Aushubarbeiten der Haupttunnelröhren, beim Corredor Bioceánico Aconcagua die Durchführung eines Erkundungsprogramms als Basis für die finale Trassenwahl.

Über die konkreten Empfehlungen für die zwei Vorhaben hinaus werden Besonderheiten langer und tiefliegender Tunnel, sowie von Untertage-Bauvorhaben in den Anden allgemein ausgearbeitet. Der Planungsprozess in Bezug auf die Hydrogeologie wird in Form von konkreten Handlungsempfehlungen dargelegt und für sechs spezielle Fragestellungen (Karst, hydraulisch bedingte Setzungen, wasserlösliche Gesteine, Wassernutzungen bzw. ökologisch sensible Gebiete, Geothermie und Einzugsgebiete) in Form von Flussdiagrammen aufbereitet.

Wesentliche Erkenntnisse betreffen die praktische Abwicklung von Projekten vergleichbarer Natur. Die Auswirkungen eines Tunnelvortriebs auf das hydrogeologische Geschehen sind von ähnlich hoher Bedeutung wie die Auswirkungen von Wasserzutritten auf den Vortriebsgeschehen. Eine Erkundungskampagne führt dann zum Erfolg, wenn die Erkundungsziele definiert sind, allen Beteiligten mitgeteilt werden und Redundanzen und Alternativen eingeplant sind. Es zeigt sich, dass mit der Anwendung von Isotopenmethoden bei tiefliegenden Tunnelvorhaben hydrogeologische Fragen unterschiedlichster Natur erfolgreich zu beantworten sind.

1 EINFÜHRUNG UND AUFGABENSTELLUNG

Rahmenbedingung

Die Trassierung eines Tunnels ist von der geplanten Nutzung und den räumlichen Determinanten abhängig. Innerhalb gewisser Freiheitsgrade und stets projektabhängig nehmen Geologie und Hydrogeologie Einfluss auf die Trassenwahl. Die Rolle und Verantwortung des Geologen und Hydrogeologen gestalten sich in Abhängigkeit der unterschiedlichen Planungsphasen.

Stand der Technik und Stand der Wissenschaft

Hydrogeologische Erkundungen für Tunnelvorhaben sind in SCHNEIDER et al. (1998) dargestellt. Über die Formelwerke und Grundlagen der Zutrittsprognose geben GATTINONI et al. (2010) eine Zusammenfassung. Instationäre Betrachtungen sind in PERROCHET & DEMATTEIS (2007) dargestellt. Zur Hydrogeologie der Störungszonen liegt eine zusammenfassende Betrachtung von BENSE et al. (2013) vor. Diese Arbeiten stellen den gehobenen Stand der Technik dar.

Der Stand der Wissenschaft zeigen in dieser Materie drei Pfeiler:

1. Weiterentwicklung des in durch GOODMAN et al. (1965), JACOB & LOHMANN (1952) erarbeiteten Formelwerkes für die hydrogeologische Prognose.
2. Für die tiefen Alpentunnel (von West nach Ost: Lyon-Turin-Ferrovioiare, Lötschbergtunnel, Gotthardtunnel, Brennerbasistunnel, Koralmtunnel, Semmeringbasistunnel) wurden insbesondere im Bereich der Hydrogeologie Methoden zur Anwendung gebracht, bei denen aufgrund der hohen Anforderungen Stand der Technik und Stand der Wissenschaft gleichwertig sind.
3. Regionalgeologisch betrachtet stellen zahlreiche Tunnelvorhaben den Stand der Wissenschaft dar, da sie den Gebirgsbau erstmalig komplett aufschließen.

Zielstellung

Am Beispiel zweier geplanter tiefliegender Tunnel, beide grenzüberschreitend zwischen Argentinien und Chile, werden die geologisch-hydrogeologischen Einflussfaktoren auf die Trassenwahl in zwei Projektstadien (Machbarkeitsstudie und Genehmigungsplanung) dargestellt.

Im Zuge dieser Arbeit wird ein Einblick in den geologischen Aufbau des Untersuchungsgebietes gegeben. Schwerpunktmäßig werden auch die hydrogeologischen Rahmenbedingungen dargestellt. Sowohl getroffene als auch noch ausstehende Entscheidungen hinsichtlich der Trassenwahl der beiden Bauvorhaben werden diskutiert. Schließlich werden die methodischen Ansätze zusammengeführt und in einem Expertensystem dargestellt, das künftig als Leitfaden verwendet werden kann.

Dabei werden regionalgeologisch-hydrogeologische Fragestellungen neu beleuchtet und unterschiedliche Standpunkte kritisch hinsichtlich möglicher Auswirkungen auf die Trassenwahl hinterfragt. Methodisch liegen die Schwerpunkte in der Auswahl und Gewichtung, einer Systematisierung und Zusammenfügung der Methoden insbesondere der Hydrogeologie großer Tunnelvorhaben.

Fallbeispiele

Die zwei genannten tiefliegenden Tunnel liegen bei den Pässen „Paso del Agua Negra“ und „Paso del Cristo Redentor“ (Abbildung 01).

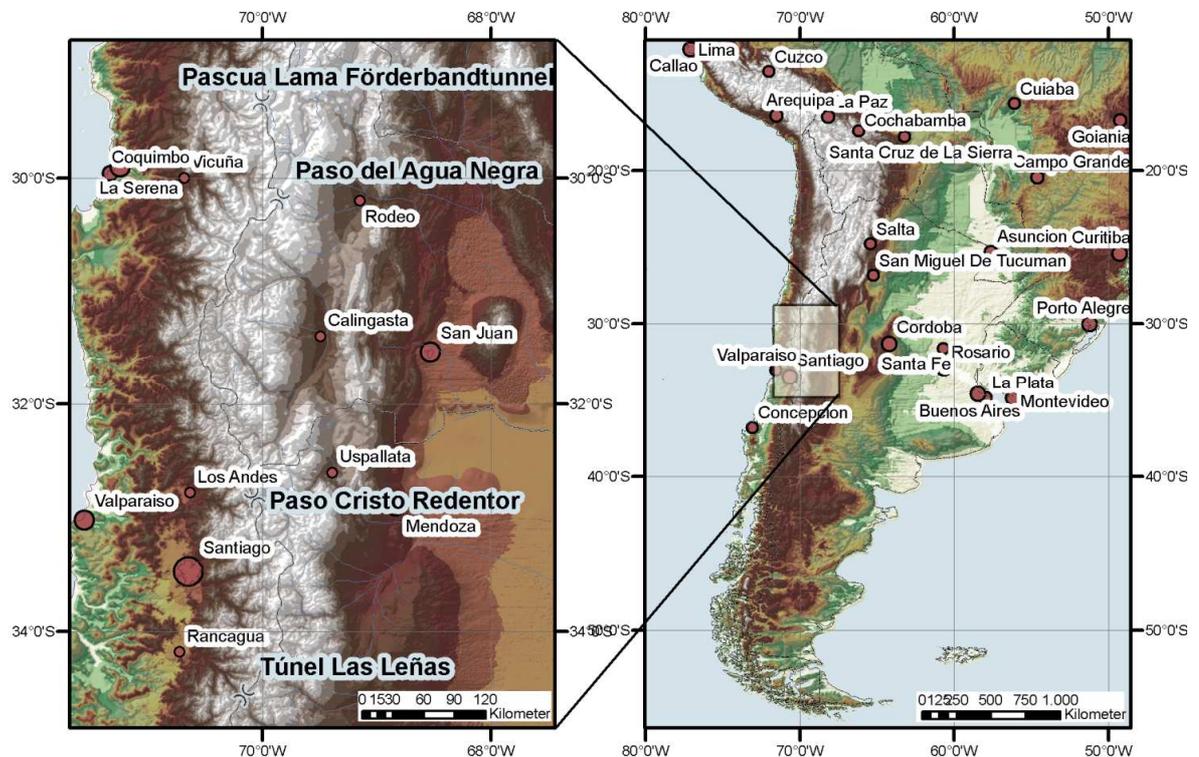


Abbildung 01. Lage der – derzeit vier – in Planung (Agua Negra, Cristo Redentor, Las Leñas) bzw. in Bau (Pascua Lama) befindlichen binationalen Andentunnel.

Eingesetzte Techniken und Methoden sind: Literaturstudie, Fernerkundung, Geländekartierung, Probenahme und hydrochemisches Untersuchungsprogramm, Erkundungsbohrungen mit hydraulischen und geophysikalischen Laborversuchen, mineralogische und felsmechanische Untersuchungen an Kernproben.

Dem Erkundungsprogramm wurde folgender Fragenkatalog zugrunde gelegt:

- Geologie: Liegen unerwartete, im Gelände nicht erkannte bzw. nicht aufgeschlossene Gesteinsschichten mit geotechnisch relevant unterschiedlichen Eigenschaften vor?
- Hydrogeologie: Untersuchung von Qualität und Quantität des Kluftgrundwassers; hydraulische Versuche.
- Alterationszonen: Prüfung auf Vorhandensein, Verfolgung von Geometrie und Eigenschaften hydrothermaler Alterationszonen.
- Störungen: Untersuchung von Evidenz, Häufigkeit, Mächtigkeit, Geometrie und geotechnisches Verhalten der Störungen.
- In-Situ-Versuche für Spannung, Deformations- und Elastizitätsmodul.
- Probenahme für felsmechanische Laborversuche.
- Geothermische Verhältnisse.

Das Bohrprogramm wurde in zwei Phasen geplant, wobei die erste Phase geologische Fragestellungen zu beantworten hatte, die die Trassierung beeinflussen sollen. Die zweite Phase hingegen war dafür vorgesehen, ein intensives Versuchsprogramm durchzuführen. Dieses war in trassennahen Bohrungen und in Abhängigkeit von den Ergebnissen der Phase 1 durchzuführen.

Die Bohrungen wurden von einem Versuchsprogramm begleitet. Es handelt sich um Versuche im Gelände (geophysikalische und hydrogeologische Feldversuche in den Bohrungen) sowie im Labor (Felsmechanik, Geologie und Hydrochemie).

2 GEOGRAPHIE UND GEOLOGIE DER UNTERSUCHUNGSGEBIETE

2.1 Geographischer Überblick

Die Projekte sind grenzüberschreitend und liegen sowohl auf argentinischem als auch auf chilenischem Staatsgebiet. Sie befinden sich im Bereich des 70. Längengrads (West) und des 30. (Agua Negra Tunnel) bzw. des 33. Breitengrads Süd (Corredor Bioceánico Aconcagua).

Das nördliche der Projekte, im weiteren Verlauf Agua Negra Tunnel oder TAN (für Túnel Agua Negra) genannt, verbindet die Regionen San Juan (Argentinien) und Coquimbo (Chile). Die jeweiligen nächstgrößeren Talorte sind Rodeo (Bezirk Iglesias) bzw. Vicuña im Bezirk Elqui. Die bestehende Passstraße (Ruta Nacional 41 in Chile und 150 in Argentinien) führt über den Paso del Agua Negra (4.775 m). Sie ist auf eine Länge von etwa 110 km nicht asphaltiert und als Schotterpiste ausgeführt. Die Straße ist meist von Mai bis November gesperrt. Die tatsächliche Dauer der Sperre variiert von Jahr zu Jahr in Abhängigkeit der Schnee- und Lawinensituation. Der Agua Negra Tunnel wird auf einer Höhe von durchschnittlich etwa 3.850 m gebaut und soll die bestehende Verbindung das ganze Jahr über befahrbar machen.

Das südliche der beiden Projekte, im weiteren Verlauf CBA für „Corredor Bioceánico Aconcagua“ genannt, verbindet die Regionen Mendoza (Argentinien) und Valparaíso (Chile). Der hier betrachtete Basistunnel liegt zwischen den Orten Punta de Vacas (Bezirk Uspallata) und Riecillo (Bezirk Los Andes). Die bestehende Passstraße, (Ruta Nacional 7 in Argentinien, 60 in Chile), führt auf eine Höhe von 3.200 m und quert hier den Paso del Cristo Redentor mit einem 3 km langen Scheiteltunnel. Der Pass selbst liegt auf einer Höhe von 3.800 m.

Über 70 % des Transitverkehrs zwischen Argentinien und Chile werden über diese Verbindung abgewickelt. Der Pass wird täglich von durchschnittlich etwa 1.000 Fernlastern gequert. Im Winter wird die Strecke schneefrei gehalten. Bei starken Schneefällen oder Lawinenabgängen kann es dennoch zu Sperrungen kommen, die bis zu mehr als eine Woche dauern können. Da es keine Ausweichrouten gibt, warten somit nach einer Woche Sperre 7.000 Fernlasten entlang der Zulaufstrecke auf freie Fahrt.

Zwei weitere und für Vergleichszwecke herangezogene Projekte befinden sich ungefähr auf gleicher geographischer Länge. Das Goldlagerstätten-Projekt Pascua Lama mit dem binationalen Förderbandtunnel befindet sich etwa 100 km nördlich des Agua Negra Tunnels, und der geplante Las Leñas Tunnel etwa 200 km südlich des Paso Cristo Redentor (Abbildung 01).

2.2 Regionale Geologie

Die Anden werden im Bereich der Projekte – zwischen dem 29. und dem 35. Breitengrad – von West nach Ost in eine Küstenkordillere („Cordillera de la Costa“), die Hauptkordillere („Cordillera Principal“), das Grenzgebirge („Cordillera Frontal“) und das Vorgebirge („Precordillera“) unterteilt (Abbildung 02). Im Raum Mendoza unterscheiden Regairaz & Zambrano (1991) die „Cerrillada Pedomontana“, niedrige Hügel östlich der Gebirge, und die östliche Ebene von Mendoza. Die Gebirge nordöstlich dieser Einheiten werden als „Sierras Pampeanas“ zusammengefasst und nicht mehr zu den Anden gezählt.

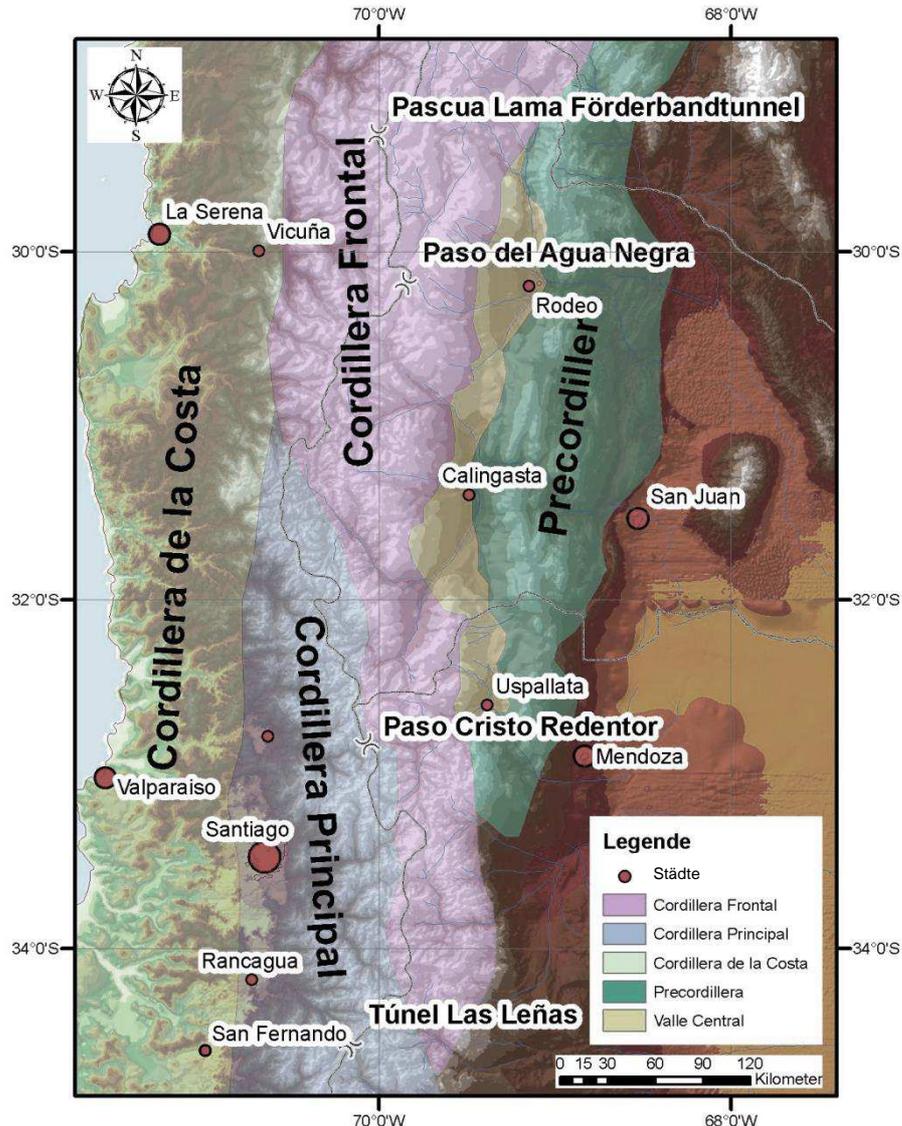


Abbildung 02. Tektonische Gliederung der südlichen Zentralanden, nach ALVAREZ & RAMOS (1999), RAMOS (2000) sowie RAMOS et al. (2004).

Die Unterscheidung erfolgt nicht ganz konsistent teils geographisch bzw. geomorphologisch, teils lithologisch. Die „Cordillera Frontal“ ist von der „Precordillera“ durch ein zentrales Tal („Valle Central“) getrennt. Teils liegt beiderseits des „Valle Central“ die gleiche Lithologie und Stratigraphie vor. Die Abgrenzung zwischen den Gesteinen der „Cordillera Frontal“ im Osten und denen der „Cordillera Principal“ im Westen erfolgt entlang einer geologisch definierten Linie.

Der bekannte Teil des geologischen Aufbaues der „Cordillera Frontal“ beginnt – vom Liegenden zum Hangenden – mit metamorphen Gesteinen des Unteren Paläozoikums. Sie wurden in Chile von MPODOZIS & CORNEJO (1988) beschrieben. In Argentinien hat GROEBER (1951) ein jungpaläozoisches, regionalmetamorphes Basement vermutet, das später durch POLANSKI (1958 & 1964) bestätigt wurde. QUARTINO beschrieb 1969 Metamorphite im Cordón del Gaucho. Dabei handelt es sich um niedrig- bis mittelgradig überprägte Gesteine, die eine metamorphe Basis des unteren Paläozoikums oder älterer Gesteine darstellen sollen.

Über den metamorphen Gesteinen folgen leicht metamorphe Sedimentgesteine des Silur sowie klastischer und bioklastischer Sedimentgesteine des Devon (RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ et al. 1996). Sie sind häufig von jüngeren magmatischen Gesteinen durchdrungen (DESSANTIS & CAMINOS, 1967). Das Karbon setzt mit einer Winkeldiskordanz ein. Es handelt sich um eine – im Vergleich zu den älteren Gesteinen – deutlich geringer deformierte Abfolge von klastischen marinen Sedimentgesteinen, die sowohl in der „Precordillera“ als auch in der „Cordillera Frontal“ aufgeschlossen ist und Mächtigkeiten von bis zu 7.000 m erreicht (APARICIO, 1975, 1984; QUARTINO & ZARDINI, 1967; CEGARRA et al., 1998; CABALLÉ, 1986).

Das Permotriassikum wird durch die vulkanische Abfolge der Choiyoi Gruppe dargestellt. Die vorwiegend aus Rhyolit, Diorit, Trachyt, Andesit und Basalt zusammengesetzte Abfolge bedeckt eine Fläche von etwa 200.000 km² und erreicht Mächtigkeiten von bis zu über 5.000 m (CAMINOS, 1965; GROEBER, 1918, 1946, 1947; MPODOZIS & CORNEJO, 1988; POLANSKI, 1958, 1964; QUARTINO, 1967, 1969; QUARTINO & ZARDINI, 1967; RAPELA & LLAMBÍAS, 1999; STAPPENBECK, 1917; STELZNER, 1923). Praktisch der gesamte Agua Negra Tunnel und wesentliche Teile des Basistunnel des Corredor Bioceánico Central verlaufen in Gesteinen dieser Abfolge.

Die magmatische Entwicklung Gondwanas während der oberen Trias, die über der Jura bis zur Unterkreide reicht, tritt vorwiegend in Form granitischer Plutone und rhyolithischer Kalderen in Patagonien auf, mit einem basaltischen Finale in der Unterkreide (RAPELA & LLAMBÍAS, 1999).

Klastische Sedimentgesteine der Mittleren und Oberen Trias sind in der „Cordillera Frontal“ und – vor allem – in der „Precordillera“ diskordant auf den Gesteinen der Choiyoi Gruppe abgelagert und wechsellagern meist mit Vulkangesteinen (MPODOZIS & CORNEJO, 1988).

Mit der Jura setzt in einer extensiven Phase die Beckenentwicklung jener Abfolgen ein, die heute im Wesentlichen die „Cordillera Principal“ aufbauen. Es handelt sich um ein Becken, das in seiner Entwicklung etwa 40 km breit war, die Längserstreckung wird auf 800 km geschätzt. Es beinhaltet hauptsächlich terrestrische und marine Sedimente (Konglomerate, Brekzien, Lutite, Sandsteine, Kalke, Evaporite), Vulkanite sowie Vulkanoklastika als auch untergeordnet Intrusivgesteine (Basalte, Granite, Granodiorite, Ganggesteine). Stratigraphisch gesehen haben sich über eine Basis karbonischen Alters (Formation Alto Tupungato) mesozoische Gesteine der Formationen La Manga, Auquilco, Tordillo, Grupo Mendoza, als auch der Formationen Cristo Redentor und Juncal abgelagert. Während des Miozäns lagerte sich die Formation Farellones ab, wobei diese granitoiden Intrusionen sowohl in die zuvor genannten Formationen eindringen, als auch an der Oberfläche extrudierten. Diese Folge des Meso- und Känozoikums charakterisiert den geplanten Corredor Bioceánico Aconcagua. Im Bereich des geplanten Agua Negra Tunnels in San Juan liegt diese Abfolge nicht vor.

Im Bereich des Agua Negra Passes liegen ebenfalls Ablagerungen des Känozoikums vor. Es handelt sich um Gesteine – durchwegs vulkanischer Natur – der Formationen „Doña Ana“ (oberes Oligozän bis unteres Miozän) und „Cerro de las Tórtolas“ des mittleren Miozäns (MPODOZIS & CORNEJO 1988, KAY et al. 1988). Sie liegen hier mit einer Winkeldiskordanz direkt auf den Vulkaniten des Permotriassikums und bilden die hochandinen Bergrücken mit Höhen von bis zu über 6.200 m.

3 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

3.1 Geologie im Zuge der Tunnelplanung

Die Planung von Tunnelvorhaben wird meist nach bestehenden Regelwerken durchgeführt. Die „*Richtlinie für geotechnische Planung von Untertagebauten mit zyklischem Vortrieb*“ der ÖSTERREICHISCHEN GESELLSCHAFT FÜR GEOMECHANIK (2008) findet nicht nur in Österreich, sondern weltweit Anwendung. Sie stellt einen wesentlichen Bestandteil der sog. „*Neuen Österreichischen Tunnelbauweise*“ (NATM) dar. Die Planungsarbeiten für die Andentunnel erfolgten – soweit anwendbar – nach dieser Richtlinie.

Demgemäß werden im Zuge der Tunnelplanung in einem ersten Planungsschritt aus geotechnisch relevanten Parametern die **Gebirgsarten** definiert. Eine Gebirgsart ist ein Gebirge mit gleichartigen Eigenschaften in geotechnischer Hinsicht. Um sie zu definieren, sind ein Geologisches Modell, Erkundungskampagnen sowie Durchführung und Interpretation von Laborversuchen notwendig.

Im nächsten Planungsschritt wird das **Gebirgsverhalten** ermittelt. Um das Gebirgsverhalten abschätzen zu können, sind Kenntnisse der Gebirgsarten, der in-Situ-Spannung, der Orientierung der maßgeblichen Gefügeelemente zum Bauwerk und zur Vortriebsrichtung, der Geometrie des Bauwerks selbst und des Bergwassers notwendig.

Dies gilt für alle Planungsschritte, vom Vorprojekt bis zu Ausführung, mit zunehmendem Grad der Detaillierung.

3.2 Hydrogeologie im Zuge der Tunnelplanung

Die Auswirkung eines Tunnelvortriebs auf die hydrogeologischen Verhältnisse ist komplex: Nur in Ausnahmefällen entwässert ein Tunnel das gesamte theoretische Einzugsgebiet entlang einer Absenkkurve, die entlang einer Tunneltrasse – bildlich dargestellt – wie ein nach unten immer steiler werdendes Tal eine dreidimensionale Form ausbildet. Die Grundwasserzutritte im Tunnel, als auch die Veränderungen im Bergwasserhaushalt und damit die hydrogeologischen Auswirkungen hängen von mehreren Einflussfaktoren ab (ÖSTERREICHISCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOMECHANIK, 2012).

Im Zuge von Planung, Genehmigungsverfahren, Ausschreibung und Bau von Tunnelvorhaben ist eine Prognose der Wasserzutritte durchzuführen. Sie umfasst nicht nur qualitative, sondern auch quantitative Parameter. Letztere, nämlich die Abflussmengen, sind für das Tunnelbauwerk während des Baus (instationär) sowohl als Einzelzutritt im Vortriebsbereich als auch als Summe am Tunnelportal zu prognostizieren (ÖSTERREICHISCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOMECHANIK, 2012). Darüber hinaus ist der auf Dauer sich einstellende quasi-stationäre Wasserzutritt relevant.

Mineralisierung, pH-Wert und Redoxpotential (E_H -Wert) sowie Temperatur sind die relevanten qualitativen Parameter. Sehr hohe Temperaturen können den Vortrieb im Zuge des Sicherheits- und Gesundheitsschutzes der Mineure beeinträchtigen, Abbindezeiten von Beton erhöhen und Einschränkungen bei der Einleitung von Wasser in die Vorflut unterliegen. Sehr niedrige pH-Werte können Beton- und Eisen angreifen, sehr hohe fördern die Versinterung von Drainagen. Die Art der Mineralisierung ist ebenfalls entscheidend für die Betonaggressivität oder die Versinterung, insbesondere im Hinblick auf die Langzeitstabilität des Bauwerks.

Bei tiefliegenden Tunnelbauvorhaben kommt es nur in Ausnahmefällen zu einer kompletten Drainierung des Gebirges. Häufig wird sich nach dem Aushub ein neues Gleichgewicht zwischen Alimentierung aus oberflächennahen, viel ergiebigeren Grundwasservorkommen und dem gering leitenden Kluftnetz darunter einstellen. Dieses Gleichgewicht wird durch die Durchlässigkeit des geringsten Wasserleiters definiert. Aufgrund der Tatsache, dass die Durchlässigkeiten meist Größenordnungen auseinander liegen, stellt der oberflächennahe Grundwasserleiter – relativ – eine quasi unendliche Quelle dar (ÖSTERREICHISCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOMECHANIK, 2012). Ein derartiges System kann schon bei wenigen Zehnermeter Überlagerung entstehen. Tektonische Störungen und störungsnahe Zerrüttungszonen spielen eine sehr wichtige Rolle und können – je nach Aufbau und Zusammensetzung – entweder als Stauer oder auch als linearer Grundwasserleiter fungieren (EVANS et al. 1997, BENSE et al. 2013).

Für die größenordnungsmäßige Berechnung des Wasserzutritts ist daher ein hydrogeologisches Konzeptmodell Voraussetzung, in dem die nachfolgenden Faktoren zu definieren sind:

- Geologisches Modell
- Wasserbilanz
- Mechanismen der Grundwasser-Neubildung
- Grundwasserleiter und Geringleiter, deren Geometrie und deren hydraulische Eigenschaften

Die Literatur für die Zutrittsprognosen basiert prinzipiell auf den Arbeiten von GOODMAN et al, JACOB & LOHMANN sowie auf Wasserbilanzen. Damit lässt sie sich auch einteilen: JACOB & LOHMANN (1952) und Nachfolgearbeiten geben die Basis instationärer, GOODMAN et al. (1965) stationärer Betrachtungen, wobei meist von der Existenz eines Oberflächengewässers ausgegangen wird; Wasserbilanzen stellen eine theoretische Obergrenze des stationären Zuflusses dar.

Aus technischer Sicht sind die *stationären* Zutritte für

- Umweltauswirkungen während des Betriebes wie
 - langfristige Auswirkungen auf Oberfläche,
 - Wasserhaushalt,
 - Änderungen von Einzugsgebieten unterliegender Gewässer,
 - Einleitung in Vorflut,

sowie

- technische Einflüsse auf das Tunnelbauwerk wie
 - Tunnelabdichtung,
 - Drainageanlagen,
 - langfristige Gewässerschutzeinrichtungen

- Verwendung der dem Bauwerk zusitzenden Grundwässer
 - in Quelfassung (z.B. Trinkwasser) im Tunnel,
 - durch thermische Nutzung der Wässer,
 - und Versorgen von Löschwasserbecken etc.

von Bedeutung, während *instationäre* Zutritte für das Baugeschehen wichtig sind. Auch hier sind baubetriebliche, umwelttechnische und praktische Anwendungen zu unterscheiden:

- Umweltauswirkungen während des Baus wie
 - Einleitung von Wässern in die Vorflut (Menge, Qualität, Temperatur)
 - Notwasserversorgungskonzept im Fall unerwarteter Beeinflussung von Wasserversorgungen,
 - Monitoringkonzept (wasserwirtschaftliche Beweissicherung, geodätisches Monitoring um durch Absenkung verursachte Setzungen zu beobachten)
- technische Einflüsse durch den Bau wie
 - Einfluss auf das Gebirgsverhalten,
 - Wassereinbrüche,
 - Dimensionierung der Gewässerschutzanlage am Tunnelportal,
- Verwendung der Tunnelwässer für die
 - Wasserversorgung der Baustelle

Zutrittsprognosen aufgrund von *Wasserbilanzen* mit dem Ansatz der vollkommenen Drainage hingegen können ebenfalls in verschiedener Hinsicht von Bedeutung sein:

- Berechnungen mit Hilfe von Formelwerken können Wasserzutrittsmengen ergeben, die aus der Wasserbilanz nicht alimentierbar sind. In all diesen Fällen ist der (niedrigere) Ansatz der vollkommenen Drainage für den stationären Fall als Obergrenze zu betrachten.
- Wasserbilanzen sind für Einzugsgebetsbetrachtungen im wasserrechtlichen Genehmigungsverfahren von Bedeutung. So können sich maximal vorgesehene Entnahmemengen in Prozent im Wasserechtsverfahren auf die Wasserbilanz beziehen. Im Zuge der Planung ist rechnerisch eine realitätsnahe Prognose der Wasserzutritte zu erstellen. Ist diese höher als die erlaubte Wassermenge, sind während des Tunnelvortriebs vorausseilende oder begleitende Injektionen zur Minderung der hydraulischen Durchlässigkeit im Nahbereich des Tunnels vorzusehen.

Die Formelwerke von GOODMAN et al. (1965) basieren auf MUSKAT (1937) und stehen für stationäre Betrachtungen. Auf ihnen bauen u.a. EL TANI, (1999, 2002, teilw. 2010); GATTINONI et al. (2010), KOLYMBAS & WAGNER, (2007), LEI (1999), PARK et al. (2008) sowie RIBACCHI et al. (2002) auf.

Eine Abnahme der Durchlässigkeit mit der Tiefe berücksichtigen ZHANG & FRANKLIN (1993) sowie EL TANI (2010). EL TANI baut auf beiden (GOODMAN et al und ZHANG & FRANKLIN) auf.

JACOB & LOHMANN (1952) entwickelten die Formelwerke von SMITH (1937) weiter und adaptierten diese für Tunnel (MARÉCHAL & PERROCHET, 2003).

LÖW stellt 2002 einen zusammenfassenden numerischen Ansatz auf Basis nicht nur von JACOB & LOHMANN (1952) und GOODMAN et al. (1965), sondern auch von ODEH & BABUH (1990) und KAWECKI (2000) dar (Ende des radialen Zustroms). Somit wird die Formel von JACOB & LOHMANN für den instationären und jene von GOODMAN et al für den stationären Zutritt herangezogen, die anderen Formeln für die dazwischen liegenden Phasen.

Auf Basis JACOB & LOHMANN entwickelte PERROCHET mehrere Arbeiten mit Vorschlägen zur Berechnung des Zutritts, (MARÉCHAL & PERROCHET, 2003; PERROCHET 2005a, 2005b und PERROCHET & DEMATTEIS, 2007). Das 2005 dargestellte Formelwerk wird 2007 mit einer angenommenen Durchörterung inhomogener Strukturen erweitert.

Alternativ zu den Formelwerken stellen JIANHGUIA & GUOLIANG 1988 eine Methode zur Prognose des Tunnelzutritts aus Karstwasser auf Basis einer Wasserbilanz vor.

Zusammenfassend kann dargestellt werden, dass sich projektübergreifend noch keine Methode zur Voraussage der Wassermenge durchgesetzt hat. Die Arbeiten von JACOB & LOHMANN (1952) sowie GOODMAN et al. (1965) werden am häufigsten eingesetzt und entsprechen dem Stand der Technik.

Für alle Berechnungen gilt gleichermaßen, dass die Berechnung der zugrunde liegenden Gebirgsdurchlässigkeit die größte Unsicherheit darstellen. Sie werden meist aus Pumpversuchen ermittelt. Unterschiedliche Interpretationen von Pumpversuchen sorgen für große Unterschiede bei den Ergebnissen.

Der einfachste konservative Ansatz für die Errechnung des stationären Zuflusses ist die Wasserbilanz unter Betrachtung des Einzugsgebiets. Sie ist geeignet, die Frage zu beantworten wie viel Grundwasser in dem Gebirge, das man theoretisch maximal entwässern kann, neu gebildet wird. Damit ergibt sich der für die stationäre Betrachtung höchstmögliche Wert.

Auch für die instationären Zuflüsse gibt es theoretische Maximalwerte. Arbeitet man mit „Durchlässigkeiten“ und der Zylinderformel, erhält man eine Zutrittsmenge für einen zu definierenden Tunnelabschnitt von z.B. 10 m Länge. Bei der Berechnung nach dieser Formel ergeben sich Werte, die auf den ersten Blick zu hoch erscheinen. In der Realität werden diese dann erreicht, wenn wassergefüllte Zerrüttungszonen angetroffen werden. Solche Wassereinbrüche klingen jedoch meist schnell ab, können aber beim Erstzutritt Probleme für Vortrieb und die Sicherheit verursachen.

Die nachfolgenden Punkte sind aus Sicht der Hydrogeologie Grundvoraussetzung für die Tunnelplanung und die Beurteilung der Umweltverträglichkeit (ÖSTERREICHISCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOMECHANIK, 2012):

- Unbeeinflusste Druckhöhe des Grundwassers vor Vortriebsbeginn und, falls möglich, voraussichtliche Druckhöhe des beeinflussten Grundwassers,

- Schüttung in l/s/10m, l/s/100m oder l/s/1000m bezogen auf definierte Homogenbereiche des geplanten Tunnelbauwerks,
- Schüttung in l/s/10m, bezogen auf definierte Störungszonen,
- Minimale und maximale Portalwassermenge beim Vortrieb,
- Langfristig (stationär) minimale und maximale Portalwassermenge,
- Temperatur, pH-Wert, Gasgehalt, Gesamtmineralisierung und Chemismus der beim Vortrieb zuzitenden Wässer sowie des Portalwassers,
- Beeinträchtigung von Oberflächengewässern, Quellen, Porengrundwasser-Vorkommen, Wasserversorgungseinrichtungen etc. sowie Beurteilung der Möglichkeit von Oberflächensetzungen, die durch Entwässerung ausgelöst werden.

Diese Angaben werden in einem hydrogeologischen Längenschnitt dargestellt. Zudem sind neben den tunnelbautechnischen auch noch nachfolgende Daten in den hydrogeologischen Längenschnitt einzutragen:

- Auf Grundwasserleitertypen vereinfachte Geologie mit Strukturelementen und Störungen,
- Lage der Erkundungsbohrungen (gegebenenfalls auf den Längenschnitt interpoliert) mit Lagen des/der während des Abteufens angetroffenen Grundwasserzutritte sowie des Ruhewasserspiegels, mit Datum und absoluter Höhe,
- Lage hydrogeologischer Aufschlüsse: Quellen, Brunnen, Feuchtgebiete, Vorfluter, Seen, Karsthohlräume etc.,
- Wasserversorgungsanlagen, Lage von Schutz- und Schongebieten.

Dasselbe gilt sinngemäß für hydrogeologische Karten.

3.3 Hydrogeologie von Hochgebirgsregionen

Bei den Untersuchungsgebieten handelt es sich um Hochgebirgsregionen. Für die hydrogeologischen Fragestellungen gelten damit entsprechende Rahmenbedingungen:

- ⇒ Ausschließlich durch Reliefenergie gravitativ gesteuertes Grundwasserregime,
- ⇒ Recharge Regime dominiert (Ausnahme: Puente del Inca Quelle beim CBA),
- ⇒ Einflüsse von Permafrost,
- ⇒ im Festgestein: Grundwasserbewegung findet praktisch ausschließlich entlang von Klüften und Störungen statt, in geologischen Zeiträumen (quasi-Stagnation),
- ⇒ markanter Gradient der hydraulischen Durchlässigkeit zwischen Lockergesteinsbedeckung und Festgestein.

3.4 Hydrogeologie der Festgesteine

Bei tiefliegenden Tunnelvorhaben überwiegt aus hydrogeologischer Sicht der Einfluss des an Klüfte und Störungen gebundenen Grundwassers. Karstgrundwasserleiter sind gesondert zu betrachten, da hier eine besondere Grundwasserdynamik und –hydraulik vorliegt. Eigenschaften von Porengrundwasserleitern sind nur in Ausnahmefällen relevant.

Bei geologischen Verhältnissen wie am Agua Negra Pass findet der Grundwasserabfluss ausschließlich entlang offener Trennflächen statt. Diese Trennflächen sind heterogen. Selten sind sie miteinander verbunden, häufig durch den Überlagerungsdruck geschlossen oder mineralisch verheilt.

Wenn das Gestein gegenüber dem Überlagerungsdruck kompetent ist, können Klüfte offen bleiben. Die Wassersäule stützt hierbei den Hohlraum und Grundwasser kann zirkulieren. Der Wasserzutritt aus den beim Tunnelbau angefahrenen Klüften ist quantitativ meist vernachlässigbar.

Von hydrogeologischer Bedeutung sind die Störungszonen, in denen der Großteil des Grundwasserflusses im Festgestein erfolgt. Häufig ist jedoch nicht die Störung selbst der maßgebliche Grundwasserleiter. In der Regel ist die Kernzone der Störung aufgrund des hohen Tongehalts ähnlich (gering) durchlässig wie das unbeeinflusste Festgestein. Der Grundwasserfluss findet ein- oder beiderseits der Störung in den Zerrüttungszonen, der Randzone, statt (EVANS et al, 1997, BENSE et al, 2013). Dort erfolgt durch die starke Zerlegung des Gebirges eine statistische Zunahme der Klüfte, deren Öffnungsweite und deren Verbindung zueinander.

Bei der Vorauserkundung sind diese Faktoren wesentlich. Wie oben dargestellt, sind stationäre und instationäre Zutritte vorauszusagen. Dies gilt für das gesamte Bauwerk aber auch für kleine Abschnitte von 10 m Länge.

Mit einer Erkundungsbohrung wird dieser Zustand simuliert: Man durchörtert mit der Bohrung mehrere hundert Meter Fels in der Annahme, dabei auch eine statistisch relevante Anzahl von Klüften und Störungen einschließlich ihrer randlichen Auflockerungszonen zu erfassen. Über die tatsächlich angetroffene Situation gibt der Bohrkern und die Bohrlochgeophysik Aufschluss. Werden nun hydraulische Versuche über diese gesamte Bohrlochstrecke durchgeführt, erhält man ein Integral über die hydraulische Durchlässigkeit aller aktiven Klüfte und Störungen, die mit ihren Randzonen den Großteil des geförderten Wassers zuführen (bzw. die eingefüllte Menge abführen).

Damit erhält man ein Integral über die Gesamtdurchlässigkeit des Festgesteins. Dies entspricht dann weitgehend dem Kontinuumsansatz in der Hydrogeologie (STRAYLE et al, 1994), der wie folgt besagt: „In jedem Aquifer variieren die Geometrie und die Orientierung der Fließwege in weiten Grenzen. Um eine statistisch zufällige Verteilung annehmen zu können, ist ein kleinstmögliches Teilgebiet zu definieren, das alle hydraulischen Eigenschaften (...) repräsentiert. Dieser Teilbereich wird *repräsentatives Elementarvolumen* genannt.“ Der Kontinuumsansatz ist dann in der Hydrogeologie des Tunnelbaus gültig, wenn die Fragestellung mit der Erkundungsmethode abgestimmt ist. Das *repräsentative Elementarvolumen* (STRAYLE et al. 1994) spiegelt sich bei der Tunnelplanung in der Frage wider, ob die den Betrachtungen zugrunde liegende Bohrung tief genug in die phreatische Zone reicht und einen repräsentativen Querschnitt über das zu erwartende Spektrum an hydraulisch wirksamen Elementen liefert. Bei diesen Betrachtungen ist zu beachten, dass

die Ergebnisse nicht durch oberflächennahe Auflockerungszonen verfälscht sein dürfen. Bezieht man diese Zonen in die Versuche ein, ohne sie bei der Auswertung entsprechend zu berücksichtigen, errechnen sich zu hohe Wassermengen für die Vortriebsphase.

Um Aussagen für die Prognose auf 10 m Vortriebslänge erstellen zu können, sind Packer-tests im Bereich von Störungszonen durchzuführen. Diese Tests werden unter der Gruppe der Drill Stem Tests zusammengefasst und umfassen Pump- und Schluckversuche, die nach constant head-, constant flow- oder recovery- Prinzipien durchgeführt werden. (Werte aus Lugeon Tests, Hydraulic Fracturing und dem Repeat Formation Test fließen bei den Betrachtungen ebenfalls mit ein, sind aber jeweils für geotechnische Zwecke bzw. für die Probenahme vorgesehen.)

Die chemischen Eigenschaften der Grundwässer im Festgestein sind – wie im Lockergestein – vom Einzugsgebiet, der geologischen Zusammensetzung des Gebirges und der Verweildauer des Wassers gekennzeichnet.

Karst stellt einen Sonderfall dar. Dessen Hydrogeologie kann hinsichtlich seiner Speichereigenschaften und Abflusscharakteristik komplexe Eigenschaften aufweisen, die sich teils jenen der Oberflächengewässer ähneln.

3.5 Isotopenhydrologie

Tritium

Das radioaktive Isotop ^3H (Tritium), mit einer Halbwertszeit von 12,32 Jahren (BÖTTCHER & USDOWSKI, 1993), gelangt aus der Stratosphäre mit den Niederschlägen ins Grundwasser. Es eignet sich durch Bestimmung der Radioaktivität gut für die Ermittlung des Alters bzw. der Verweildauer von Grund- und Quellwässern. Seine Konzentration wird in Tritium units (TU) angegeben, wobei eine TU 0,119 Bq/l entspricht. In der Zeit vor den atmosphärischen Atombombenversuchen - Anfang der 1950-Jahre - betrug der ^3H -Gehalt des Niederschlages etwa 5 TU (ROETHER, 1967). Bis zum Jahr 1963 stieg der Tritiumgehalt im Niederschlag als direkte Folge der Atomtests stark an (bis über 2000 TU). Seit 1964, nach Einstellung der Atomtests, erfolgt eine annähernd exponentielle Abnahme des ^3H -Gehaltes im Niederschlag. Daraus resultiert die Möglichkeit, die mittlere Verweildauer von Grundwässern (<100 Jahre) aufgrund des Anstieges oder Abfallens seines ^3H -Gehaltes abzuschätzen.

Bei Tritium ist die Interpretation der mittleren Verweildauer vom Wasser durch die Abflachung der Berechnungs- bzw. Bestimmungskurve in den letzten 20 Jahren immer unschärfer und damit schwieriger geworden. Für eine genaue Bestimmung sind mittlerweile lange Messreihen (2-3 Jahre) notwendig.

Wesentlich genauer ist heute die Tritium/Helium-Methode. Sie ist ebenfalls für junge Wässer mit einem Alter von ca. 0 bis 50 a geeignet. Die Tritium-Helium-Methode beruht zum einen auf der Messung des Tritiumzerfalls und zum anderen auf der Messung des dabei entstehenden sogenannten tritiogenen Heliums ($^3\text{He}_{\text{tri}}$). Das Alter wird somit nicht nur aus der Tritiumaktivität allein, sondern auch aus der Summe von Tritium und seinem Zerfallsprodukt ^3He ermittelt.

Stabile Isotope Sauerstoff-18, Sauerstoff-17 und Deuterium

Die Bestimmung der stabilen Isotope Sauerstoff-18 ($\delta^{18}\text{O}$), Sauerstoff-17 ($\delta^{17}\text{O}$) und Deuterium ($\delta^2\text{H}$) erlaubt eine Reihe hydrologischer Anwendungen. Schwerere Isotope werden in Folge von Isotopen-Fraktionierungsprozessen bei relativ geringeren Temperaturen im natürlichen Wasserkreislauf abgereichert. Im Niederschlag zeigt sich ein charakteristischer Jahresgang, der im Wesentlichen durch die Lufttemperatur bestimmt wird und damit ein Minimum im Winter und ein Maximum im Sommer aufweist („Jahreszeiteneffekt“). Die Temperaturabhängigkeit bedingt weitere Effekte wie den „Höheneffekt“ (Abreicherung bei hochgelegenen Neubildungsgebieten) und den „Breiteneffekt“ (Abreicherung mit wachsender geographischer Breite bzw. abnehmender mittlerer Jahrestemperatur). Da isotopisch leichtere Moleküle bei Phasenübergängen (z.B. Verdunstung und Kondensation) in der stärker flüchtigen Phase angereichert werden, verringert sich der Gehalt an schweren Isotopen zudem mit wachsendem Abstand von der Küste („Kontinentaleffekt“) und bei zunehmender Niederschlagsmenge („Mengeneffekt“) (MOOK, 2000).

Die Sauerstoff-18-, Sauerstoff-17- und Deuteriumgehalte werden als Abweichung in Promille bezogen auf einen weltweiten Standard (SMOW, „Standard Mean Ocean Water“ oder V-SMOW, „Vienna Standard Mean Ocean Water“) angegeben. Für meteorische Wässer besteht eine lineare Beziehung zwischen dem $\delta^{18}\text{O}$ - und $\delta^2\text{H}$ -Wert, die als Niederschlagsgerade (MWL, „Meteoric Water Line“, GMWL, „Global Meteoric Water Line“) bezeichnet wird (CRAIG, 1961, DANSGAARD, 1964, KILCHMANN et al, 2004).

Anhand der Deuterium- und Sauerstoff-18-Gehalte sind Aussagen zu den Temperaturverhältnissen während der Neubildung bzw. zur Höhenlage des Neubildungsgebietes und somit zur Herkunft der Wässer möglich. Vorteilhaft zur Interpretation ist die Kenntnis des Jahresgangs an einer Niederschlags-Messstelle im Untersuchungsraum. Darüber hinaus können anhand von Verdunstungseffekten z.B. einsickernde Oberflächenwässer erkannt werden. Sofern für eine Messstelle mindestens ein vollständiger Jahresgang der Sauerstoff-18-Werte vorliegt, sind auch Aussagen zur mittleren Verweilzeit möglich.

Deuterium-Exzess

Der Deuterium-Exzess ist die Abweichung des Deuteriumgehalts von der GMWL, die durch die Formel

$$\delta D = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10$$

mit: δD = Deuteriumgehalt in ‰ vom SMOW
 $\delta^{18}\text{O}$ = Sauerstoff 18 in ‰ vom SMOW

ausgedrückt wird. Der Deuterium-Exzess d wird wie folgt berechnet (DANSGAARD, 1964):

$$d = \delta D - 8 * \delta^{18}\text{O}$$

Die Phasenübergänge des Wassers erfolgen im Gleichgewicht entlang der GMWL. Darüber hinaus können kinetische Effekte aufgrund der unterschiedlichen Diffusivität isotopisch unterschiedlich zusammengesetzter Wassermoleküle in der Luft entstehen. Die höhere Diffusivität des Moleküls $^2\text{H}^1\text{H}^{16}\text{O}$ im Vergleich zu $^1\text{H}^1\text{H}^{18}\text{O}$ führt zu einer zusätzlichen Separation, einem höheren Deuterium-Exzess. Feuchtigkeit, Sättigung, Meerestemperatur und Windgeschwindigkeit sind hier die wichtigsten kontrollierenden Faktoren – im Gegensatz zur Kondensation in den Wolken, die wenig Einfluss hat. Als Resultat liegt ein

eindeutiger Jahreszeiteffekt vor. Damit lässt sich – bei ausreichender Anzahl von Proben – die Herkunft des Wasserdampfes feststellen (SCHOTTERER et al. 1996).

Strontium und Strontium Isotopen-Analysen

In Calcit, Sulfatmineralen, Feldspäten und anderen Silikaten substituiert Sr (Strontium) das wesentlich häufigere Ca (Kalzium). Über Lösungsprozesse nimmt Sr an Wasser-Gestein-Interaktionen teil und alle Grundwässer führen Strontium in variablen (geringen) Konzentrationen.

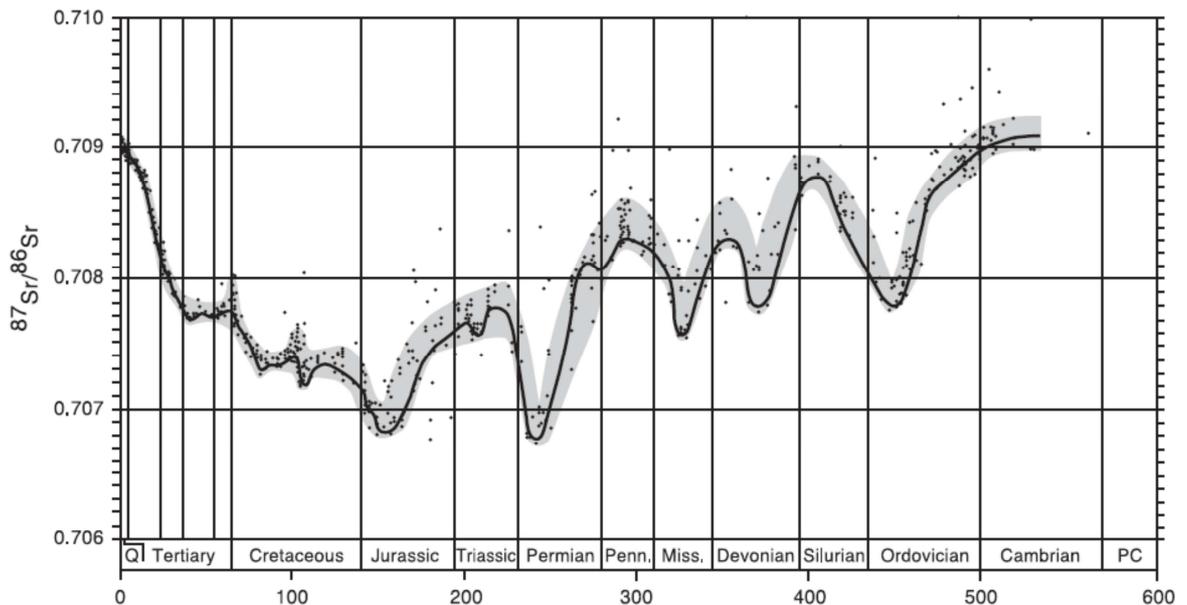


Abbildung 03. Die nach BURKE et al. (1982) sekuläre Kurve für Änderungen des $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisses während des Phanerozoikums auf Basis von Analysen mariner Karbonate, Evaporite und Fossilien. Die Zahlen auf der x-Achse stehen für Millionen Jahre. Aus: BANNER (2004).

Das Sr-Isotopenverhältnis ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) stellt einen hydrogeochemischen Tracer dar, der im Gegensatz zu anderen Isotopenverhältnissen nicht durch Lösungs- bzw. Fällungsprozesse beeinflusst (fraktioniert) wird. Das Grundwasser reflektiert daher die Sr-Isotopie des Gesteins bzw. des Minerals. Entscheidend für das $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnis im Grundwasser ist einerseits die Sr-Konzentration des Edukts, andererseits dessen Löslichkeit. Sr-reiche und leicht lösliche Minerale kontrollieren daher das $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnis im Grundwasser.

Marine Karbonate und Evaporite, die nicht diagenetisch alteriert sind, zeigen generell Isotopenwerte zwischen 0,7067 und 0,7093 (BÖTTCHER & USDOWSKI, 1993). Das bedeutet, dass Wasser in Reaktion mit marinen Karbonaten und Evaporiten generell niedrigere $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werte aufweisen (niedrigradiogenes Wasser). Wasser in Reaktion mit Silikaten, z.B. in Kristallingesteinen, hingegen weisen höhere $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Werte ($> 0,7100$, hochradiogenes Wasser) auf (MATTER et al, 1987).

Schwefel-34 und Sauerstoff-18 an Sulfat

Sulfat ist ein Haupt-Anion im Grundwasser, das in natürlichen Grundwässern hauptsächlich aus der Lösung von sulfathaltigen Evaporiten bzw. aus der Oxidation von Sul-

fidschwefel stammt (KILCHMANN et al, 2004). Eine nur lokal wichtige Quelle kann der Eintrag durch atmosphärische Deposition sein.

Der Gehalt an $\delta^{34}\text{S}$ sowie das Sauerstoff-18 ($\delta^{18}\text{O}$) am Sulfat-Ion können zusammen mit anderen hydrogeochemischen Daten zur Ermittlung der Herkunft des Sulfat-Anteils eingesetzt werden (BÖTTCHER & USDOWSKI, 1993, KROUSE, 1980, MILLEN et al, 2002, PASTORELLI et al, 2001). Sulfat, das aus der Lösung von marinen Evaporiten stammt, übernimmt deren S-Isotopie ohne nennenswerte Fraktionierung und spiegelt somit die bekannt positiven $\delta^{34}\text{S}$ Werte des fossilen Meerwassers wider: +10 bis +30 ‰ VCDT (Vienna Canyon Diablo Troilite). Da diese Werte während der Erdgeschichte starken globalen Schwankungen unterworfen waren (CLAYPOOL et al, 1980, GÖTZINGER et al, 2001, PALMER et al, 2004), kann mit Hilfe der S-Isotopenanalyse sulfathaltiger Grundwässer auf die stratigraphische Zuordnung der Evaporitgesteine im Untergrund geschlossen werden.

Durch die Kombination des $\delta^{34}\text{S}$ Parameters mit dem $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnis kann eine hohe Trennschärfe erzielt werden (PEARSON et al, 1991, SPÖTL & PAK, 1996). In sauerstofffreien (Tiefen)Grundwässern können sekundäre bakterielle Prozesse zu einer Modifizierung des $\delta^{34}\text{S}$ Wertes führen (bakterielle Sulfatreduktion); der $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Wert ist hiervon aber nicht betroffen.

3.6 Geothermie

Die Bestimmung der Gebirgstemperatur bzw. die der Temperatur des angetroffenen Bergwassers ist für die Tunnelplanung bei tiefliegenden Tunnelvorhaben notwendig. Temperaturen über 28°C stellen Erschwernisse bei Bau und Betrieb dar. Besonders hohe Temperaturen (>> 45°C) spielen bei Materialeigenschaften der Tunnelausrüstung eine Rolle. Ist eine Nutzung der geothermischen Energie von Tunnelwässern vorgesehen, kommt der geothermischen Prognose eine praktische Bedeutung zu.

Stark vereinfacht liegt ein direkt zusammenhängendes System zwischen geothermischem Gradienten, Wärmeleitfähigkeit des Gebirges und Wärmefluss vor. Dabei leitet sich der Wärmefluss aus thermischem Gradient und Wärmeleitfähigkeit her. D.h., mit zwei bekannten Werten lässt sich der Dritte errechnen.

$q_i = \lambda_{ij} * \frac{\partial T}{\partial x_j}$ FOURIER Gesetz der Wärmeleitung. q_i ist die Wärmeflussdichte, λ_{ij} ist der

Wärmeleitfähigkeitstensor und $\frac{\partial T}{\partial x_j}$ der geothermische Gradient (CLAUSER & HUENGES, 1995).

Dieses Verhältnis beschreibt den rein konduktiven Teil des Wärmeflusses, dessen Senke die Erdoberfläche darstellt. Die Wärmeleitfähigkeit ist von Druck und Temperatur abhängig und kann je nach Gesteinsart ausgesprochen anisotrop sein (BUSSLINGER, 1998, CLAUSER & HUENGES, 1995). Bei Änderungen der Temperatur (z.B. durch tektonische Senkungs- und Hebungszonen, Auftauen von Permafrost durch Klimawandel, Erhöhung oder Absenkung der Gebirgstemperatur durch Tunnelvortrieb etc.) ist die spezifische Wärmekapazität zu beachten.

Einflüsse des Poren- bzw. Kluftvolumens und der Menge des in den Klüften zirkulierenden Grundwassers können von großer Bedeutung sein. Numerische Ansätze zu deren Quanti-

fizierung sind in BUSSLINGER (1998) dargestellt. Wasser hat eine im Vergleich zu Gesteinen geringe, im Vergleich zur Gasphase sehr hohe Wärmeleitfähigkeit. D.h., ohne Grundwasserbewegung ist die Wärmeleitfähigkeit eines geklüfteten, ungesättigten Gebirges kleiner als die eines gesättigten Gebirges, und dieses wiederum kleiner als ein ungeklüftetes Gebirge.

Das Grundwasser ist allerdings meist in Bewegung. Damit können über Konvektion große Mengen an thermischer Energie verschoben werden (BUSSLINGER, 1998). Die entsprechenden Einflüsse müssen neben den thermischen Eigenschaften der fluiden Phase mit den hydrogeologischen verknüpft werden (Transmissivität, Abfluss, Grundwasserneubildung, Porenvolumina etc.).

Bei stark geklüftetem Gebirge bzw. sehr mächtigen Störungszonen wird der Unterschied zwischen Gestein und Gebirge relevant. Neben dem Ausgangsgestein werden die Wärmeleitfähigkeit von Kluffüllungen und Wasser relevant.

Für die Prognose sind zudem Effekte der Geomorphologie (JABOYEDOFF, 1999), des radioaktiven Zerfalls im Gebirge, des Permafrosts und der Solarstrahlung zu beachten. Letztere weist in einem der Untersuchungsgebiete (Agua Negra Pass) überdurchschnittlich hohe Werte auf (SCHROTT, 1994). Zudem ist auch die Senke an der Grenzfläche Gebirge – Atmosphäre quantitativ schwer zu definieren – sie liegt zwar nah an der Jahresmitteltemperatur, unterliegt aber neben den genannten Einflüssen auch Faktoren wie Bewuchs, Besiedlung, Hydrographie etc.

Die oben dargestellten Verhältnisse Gradient (Abbildung 30) – Leitfähigkeit (Abbildung 05) – Wärmefluss (Abbildung 04) werden durch diese Faktoren in verschiedene Richtungen verschoben, sodass bei der Auswertung der Daten eine Gewichtung der Einflüsse durchzuführen ist. Diese kann teils durch einfache numerische Berechnungen unterstützt werden, teils ist man auf Schätzungen angewiesen (aus: HÖFER-ÖLLINGER & MILLEN, 2010).

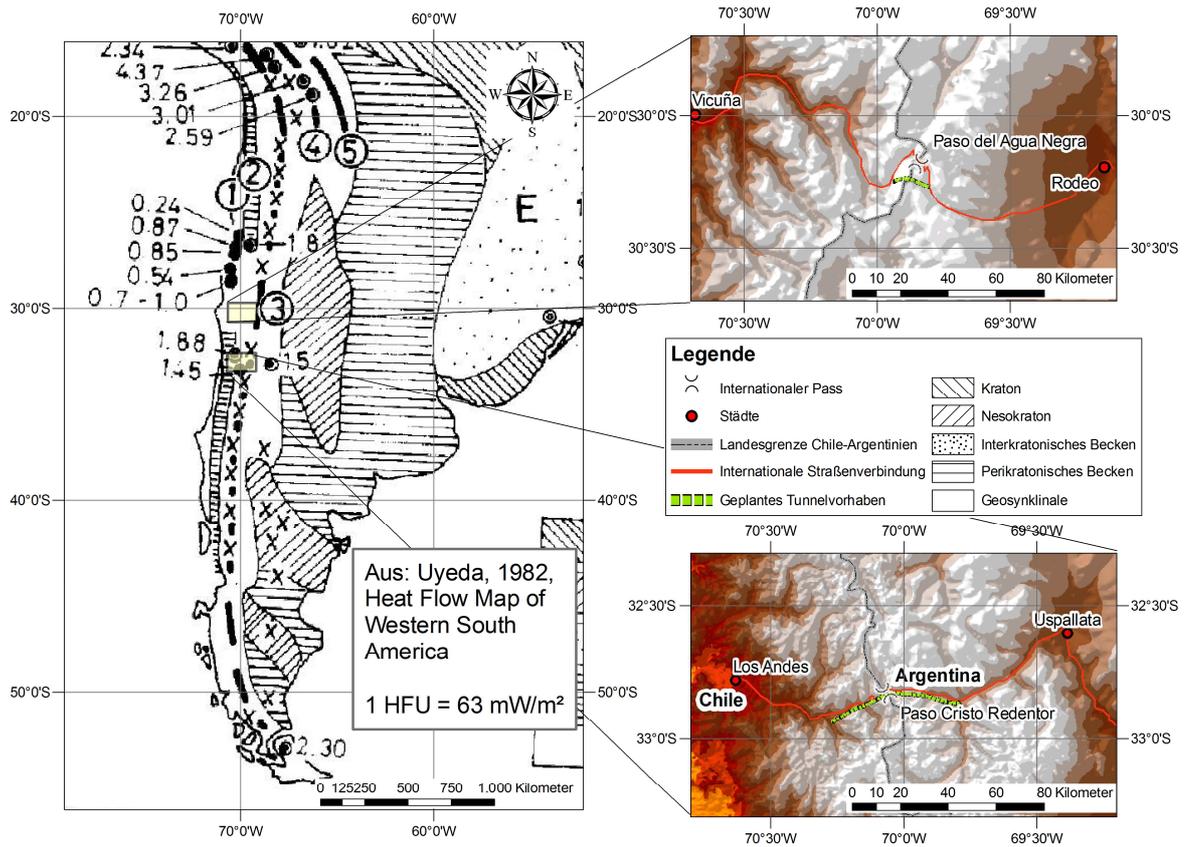


Abbildung 04. Wärmeflusskarte von Südamerika (UYEDA & WATANABE, 1982), mit Lage der Projekte Agua Negra Tunnel im Norden und Corredor Bioceánico Central (aus: HÖFER-ÖLLINGER & MILLEN, 2010).

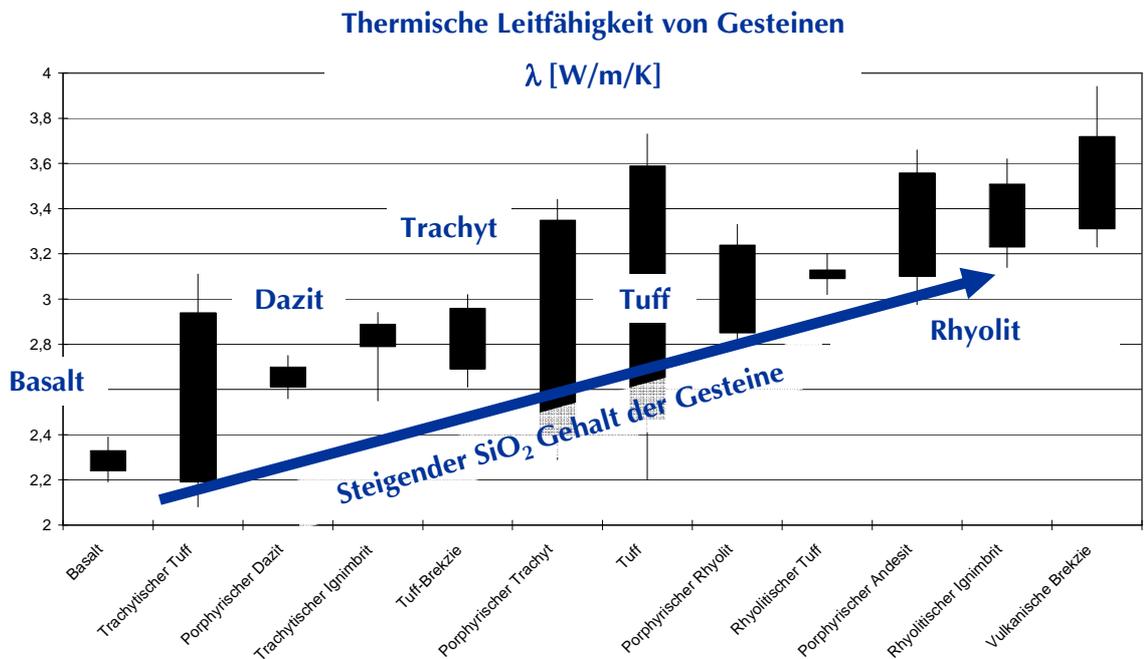


Abbildung 05. Thermische Leitfähigkeit der Gesteine der Formation Choiyoi (aus: HÖFER-ÖLLINGER & MILLEN, 2010).

4 AGUA NEGRA BASISTUNNEL

4.1 Vorhaben

Der Agua Negra Basistunnel soll als zweiröhriger Straßentunnel mit je zwei Fahrbahnen ausgeführt werden. Aus geologisch-hydrogeologischer Sicht ist dieses Vorhaben von besonderer Bedeutung, da Überlagerungen von bis zu mehr als 1.700 m druckhaftes Gebirge und hohe Temperaturen erwarten lassen. Es werden mächtige Störungszonen durchörtert. Kartierungs- und Erkundungsarbeiten standen bei Höhen zwischen 3.600 und 6.000 m Seehöhe unter Einfluss von Permafrost und niedrigem Sauerstoffgehalt in der Atemluft in dieser extremen Höhe. Die wesentlichen Eckdaten sind in Tabelle 01 aufgelistet.

Tabelle 01 Die wesentlichen Eckdaten des Agua Negra Tunnels.

Technische Daten des Agua Negra Tunnels	
Länge	13.927 m (längere Nordröhre)
Längsneigung	3.37 %
Entwurfsgeschwindigkeit	100 km/h
Minimale horizontale Kurvenradien	2.400 m
Abstand zwischen den zwei Röhren	60 m (80 im Bereich höchster Überlagerung)
Höhendifferenz zwischen den Portalen	465 m
Höhe des chilenischen Portals	3.620 m
Höhe des argentinischen Portals	4.085 m
Höhe des Lüftungsschachtes	4.445 m
Maximale Überlagerung	1.750 m
Tiefe des Lüftungsschachts	535 m
Durchmesser des Ausbruchs (TBM)	12,4 m
Ausbruchsdurchmesser (Konventionell)	11,8 m
Gesamtlänge der ausgebrochenen Stollen	ca. 30 km
Gesamtvolumen des Ausbruchsmaterials	ca. 3,5 mio m ³ (ohne Auflockerung)
Fluchtwegabstand	340 m
Abstand der Parknischen	1.000 m
Abstand der befahrbaren Querschläge	1.000 m

Abbildung 06 zeigt die Lage des geplanten Tunnels in Relation zur derzeitigen Passstraße. Abbildung 07 bringt einen schematischen Längenschnitt mit den wichtigsten geometrischen Daten.

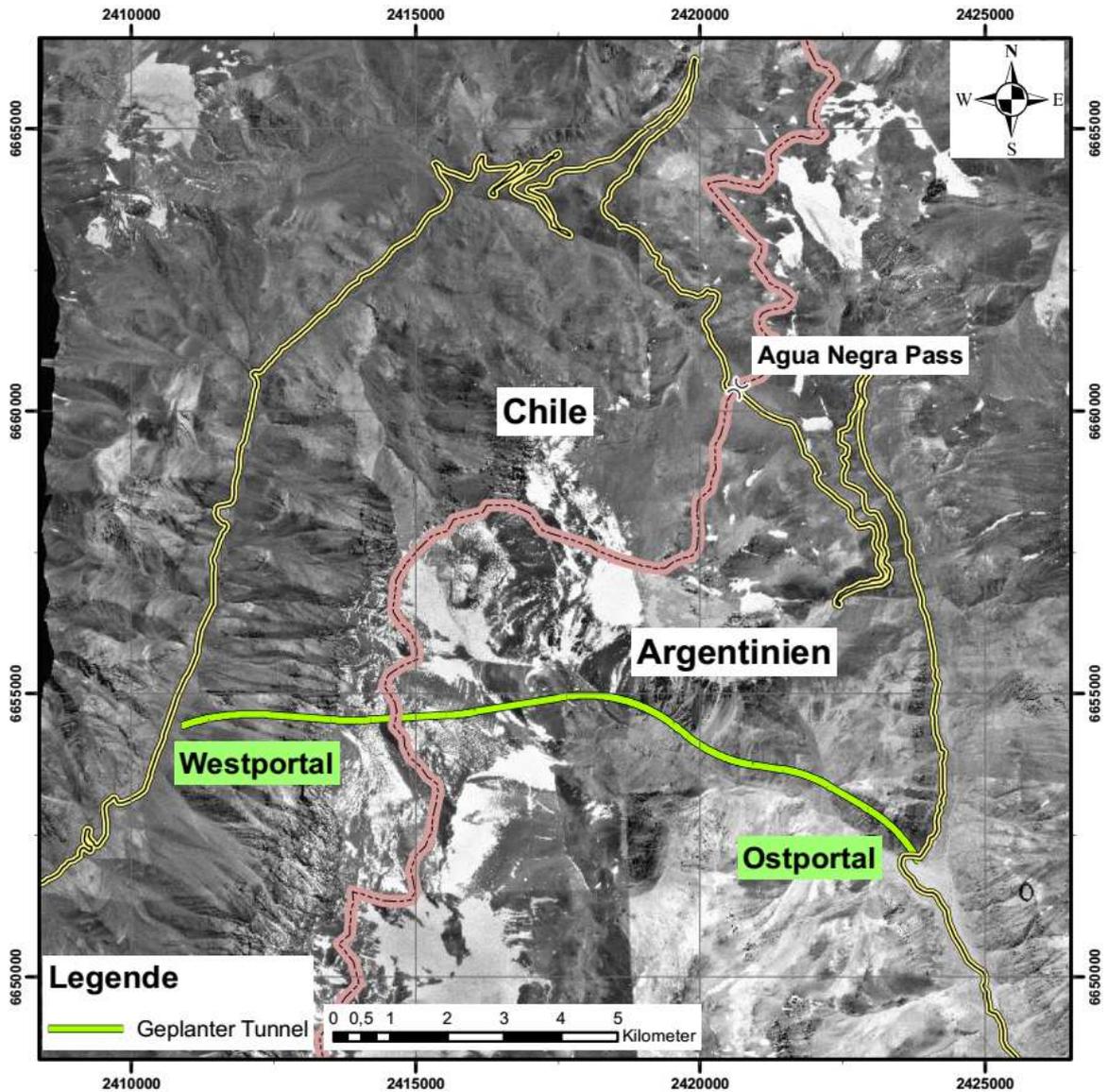


Abbildung 06. Luftbildaufnahme und Lageplan des geplanten Tunnels. Dargestellt sind die internationale Grenze und die bestehende Passstraße.

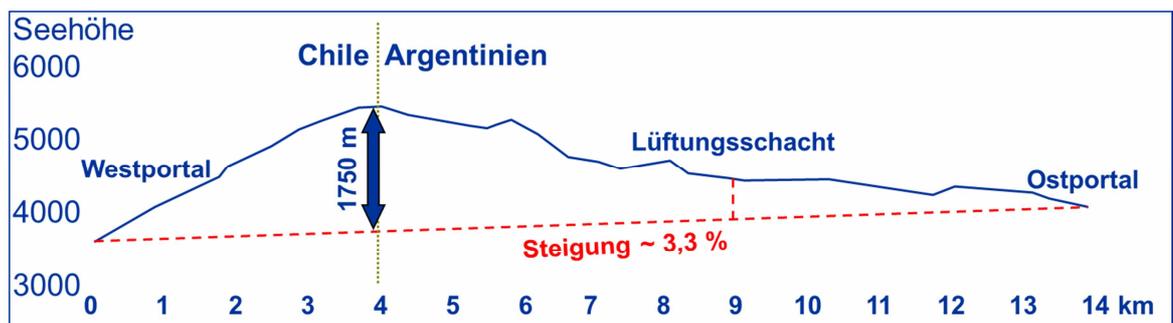


Abbildung 07. Schematische Skizze mit den wichtigsten geometrischen Eckdaten.

Im Bereich der höchsten Überlagerung ist die Integration eines physikalischen Labors vorgesehen (Abbildung 08, BERTOU, 2011).

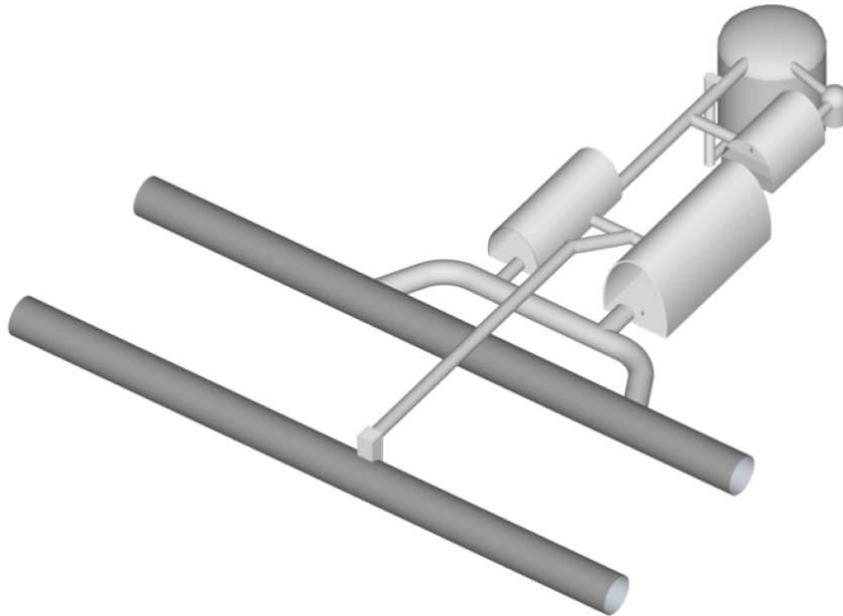


Abbildung 08. Schematische Skizze des ANDES Labors. Die zwei unteren Röhren stellen die Haupttunnelröhren des Agua Negra Tunnels schematisch dar. Aus: BERTOU, 2011.

4.2 Geologisches Modell

Gesteine der Choyoi Gruppe

Die Gesteine der Choyoi Gruppe werden in einen unteren und in einen oberen Abschnitt unterteilt. Der untere Abschnitt ist vorwiegend andesitisch, grau bis grünlich, meist porphyrischer Textur und teilweise afanitisch (extrem feinkörnig). Untergeordnet gibt es lithologische Variationen mit etwas mehr basischen Zusammensetzungen, bis hin zu basaltisch, oder – umgekehrt – etwas saurer, mit größeren Phenokristallen aus Plagioklas.

Der obere Abschnitt wird von vulkanischen Brekzien andesitischer und rhyolitischer Zusammensetzung geprägt, die durch Einschaltungen mächtiger Horizonte von Ignimbriten und pyroklastischer Bänke getrennt sind. Beiden Abschnitten ist gemein, dass man die Oberflächen der einzelnen Ergüsse und die Kontakte zwischen ihnen sowohl aus der Entfernung als auch im Aufschluss erkennen kann.

Dazu kommt eine Vielzahl von Intrusivkörpern andesitischer, basaltischer, aplitischer und rhyolitischer Zusammensetzung. Sie sind meist diskordant und zumindest theoretisch weiter oben aufgeschlossenen Extrusiva zuordenbar. Zudem liegt eine Reihe konkordanter Ganggesteine (Sills) vor.

Es ist davon auszugehen, dass einige dieser Intrusiva nicht zur Choyoi Gruppe, sondern zu den tertiären Vulkaniten der Formation Doña Ana gehören. Eine Unterscheidung im Gelände ist praktisch unmöglich.

Sedimentäre Einschaltungen in Form von Sandstein und Konglomerat aus Feinkies zeigen ein bis drei Meter Mächtigkeit und sind z.B. im Bereich der Quebrada Olivares Norte aufgeschlossen.

Gesteine der Formation Doña Ana, Tertiär

Es handelt sich um eine Gruppe vulkanischer Gesteine wie Brekzien, Tuffe und Ignimbrite, die diskordant auf den Gesteinen der Choiyoi Gruppe liegen.

Im Arbeitsgebiet bedecken die Gesteine dieser Formation die höchsten Abschnitte des Gebirges und bilden dort Plateauflächen einer alten Landoberfläche. Westlich des Río Colorado treten diese Gesteine bis zu etwa 2000 m tiefer auf, was auf eine tektonische Abschiebung hinweist.

Die petrographische Zusammensetzung ist vorwiegend rhyolitisch, teils treten auch Andesite und Basalte auf. Die Formation ist markant farbenfroh, was auch zu entsprechender Namensgebung führt („Quebrada Colorada“ in Chile). Es treten meist helle Tönungen auf, grau mit rosa Schattierung und weiß, sowie violett und schwarz. Es handelt sich um Gesteine porphyrischen Gefüges mit zahlreichen Fließstrukturen. Die ignimbrischen Einschaltungen zeigen häufig flammenartiges Gefüge und Blasen.

Quartärgeologie

Die Geomorphologie des Agua Negra Tales wurde von ELISSONDO (2006) aufgenommen. Im Untersuchungsgebiet liegen demnach sedimentäre Brekzien, Agglomerate, fein- und grobklastische Sedimente glazialen, glazigenen und fluviatilen Ursprungs vor.

Die wichtigsten Akkumulationsformen sind eng mit den einhergehenden Prozessen verknüpft: Blockgletscher, Massenbewegungen, Seitenmoränen, Schuttkegel aus Hangschutt sowie alluviale Schwemmfächer, fluviatile Talfüllungen und eine meist dünne Schicht aus Detritus in den Bereichen geringerer Geländeneigung.

Im Untersuchungsgebiet gibt es eine Reihe von Verebnungsflächen im Talverlauf, die durch unterschiedliche Einbringungen von Material gestaut werden. Die für das geplante Tunnelprojekt wichtigste Fläche ist die Llano de los Liebres – die „Hasenebene“ – an der das chilenische Portal mit allen seinen Einrichtungen und die Deponieflächen für das Ausbruchsmaterial angeordnet werden sollen. Die Llano de los Liebres wird durch einen linksufrig (östlich) einspringenden Schuttfächer gestaut. Weiter flussabwärts – in Richtung Vicuña – gibt es einen See, der ursprünglich durch einen Bergsturz eingestaut wurde. Inzwischen sorgt ein künstlicher Damm dafür, dass der See erhalten bleibt und der Río Colorado sich nicht noch weiter in das relativ weiche Bergsturzmaterial einschneidet. Auch etwa 1 km flussaufwärts des Portals zeigen Relikte eines Bergsturzes und – vor allem – Sedimentreste an den Talrändern oberhalb – dass es zu so einem Ereignis gekommen war. Hier hat sich der Río Colorado in der Zwischenzeit auf das Niveau der Llano de los Liebres eingeschnitten.

Auch auf der argentinischen Seite gibt es solche Verebnungen – die auffälligste ist die oberhalb Ojos del Agua, etwa 15 km südöstlich des argentinischen Portals, die an zwei Schuttfächern gestaut ist. Der Río Agua Negra versickert hier regelmäßig und tritt mehrere hundert Meter unterhalb in mehreren Quellen wieder zu tage.

Im Bereich der Quebrada di San Lorenzo kommt es ebenfalls zu so einer Erscheinung, wenn auch weniger deutlich, und zwar oberhalb der Hangrutschung. Der Felssturz der Quebrada Olivares Norte staut periodisch einen See ein, der nur bei starker Schüttung seines Zuflussbaches Wasser führt. Bei niedrigeren Schüttungen trocknet er aus und der Bach versickert direkt in den Bergsturzmassen.

Im Untersuchungsgebiet treten mehrere Vorkommen von Blockgletschern auf. Die vier wichtigsten sind:

1) Blockgletscher „Dos Lenguas“.

Dieser Blockgletscher wurde ausführlich von SCHROTT (1994, 2002) beschrieben. „Dos Lenguas“ bedeutet „zwei Zungen“ und entspricht seinen morphologischen Erscheinungsbild. Das Liefergebiet liegt an einem Störungssystem. Gemäß SCHROTT (1994) liegt die Wurzelzone auf 4.550 m, die Stirnfront auf 4.200 m. Die Mächtigkeit wird demgemäß mit durchschnittlich 50 m eingeschätzt. Am 31.01.2008 wurde aus der am Fuß des Blockgletschers entspringenden Quelle eine Wasserprobe gezogen (Quelle 019 in Abbildung 19). Die vor-Ort-Parameter zeigen eine Temperatur von 3,6°C und eine elektrische Leitfähigkeit von 478 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Mit dieser Temperatur ist die Quelle eine der kältesten auf dieser Höhe (4.170 m). Der hydrochemische Befund zeigt Ca-SO₄-Chemismus.

2) Blockgletscher entlang der Quebrada di San Lorenzo.

Dieser Blockgletscher liegt direkt oberhalb des geplanten Agua Negra Tunnels. Der Blockgletscher ist aktiv und wird von Lawinenschutt aus der Südwand des Cerro Sarmiento (5.400 m) genährt. Die Zunge liegt auf 4.200 m, während sich die Akkumulationszone bis auf Höhen von 4.800 m erstreckt. Die Länge beträgt etwa 3 km. Seine Mächtigkeit kann aufgrund der vermuteten Talgeometrie auf bis zu über 200 m geschätzt werden, die tatsächliche Mächtigkeit der durchfrorenen Zone ist unbekannt. Im oberen Drittel entsteht durch Thermokarst ein Gletschersee. Der Blockgletscher wird entlang der unteren 2 km seitlich von einem Gletscherbach begleitet, der an den südlichen Talrand der Quebrada gedrängt wird. Es handelt sich um einen der größten Blockgletscher im Untersuchungsgebiet.

3) Blockgletscher: Gefrorener Felssturz bei Einmündung der Quebrada Olivares Norte in die Quebrada di San Lorenzo.

Auch wenn noch heute ständige Steinschlagereignisse beobachtbar sind, handelte es sich initial um ein größeres Ereignis, das einen Schuttkegel erzeugt hat, der nun gefroren ist. Die Seehöhe beträgt hier 4.200 bis 4.500 m. Der Kegel bildet einen natürlichen Damm, oberhalb dessen – je nach Wasserführung – der Bach in der Quebrada Olivares Norte zu einem mehr oder weniger großen See gestaut wird. Der Bach versickert jedenfalls in der Blockmasse und man kann davon ausgehen, dass die Quellen am Fuß des Blockgletschers zum Großteil von diesem Bach gespeist werden (Wiederaustrittsquellen). Diese Quellen (Quellen 039 und 040 in Abbildung 19) zeigen bei niedriger Mineralisierung (95,6 bzw. 96,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$) einen Ca-HCO₃-Chemismus und erwartungsgemäß niedrige Temperaturen (3,6 bzw. 5,2°C).

4) Blockgletscher Sarmiento

Dabei handelt es sich um einen ca. 2 km langen Körper zwischen 4.600 und 5.100 m unter dem Ostwänden des Cerro Sarmiento. Er wird in SCHROTT (1994, 2002) als Blockglet-

scher „El Paso“ bezeichnet. Gemäß SCHROTT (1994) beträgt seine Länge 1.900 m, bei einer durchschnittlichen Breite von 200 bis 300 m, die Oberfläche betrug um 1990 0,663 km². Die Quelle dieses Blockgletschers tritt auf einer Höhe von 4.630 m aus (Quelle 013 in Abbildung 19). Die Wassertemperatur betrug bei einer Probenahme am 30.01.2008 0,4°C, die Leitfähigkeit 92,9 µS/cm; am 17.11.2010 0,1 °C und 70,2 µS/cm. Der hydrochemische Befund vom 30.01.2008 zeigt bei sehr geringer Mineralisierung einen Ca-Na-HCO₃-SO₄-Typ. Am 17.11.2010 wurden an dieser Quelle eine Probe für Isotopenanalytik gezogen (Nr. 8 in Abbildung 23). Das Ergebnis zeigt hier mit -20,985 ‰ δ¹⁸O den niedrigsten im Projektgebiet gemessenen Wert (siehe auch 0).

Massenbewegungen

Bereits bei den ersten Begehungen im Januar 2008 wurde ein Augenmerk auf gravitative Massenbewegungen gelegt. Dies hatte zur Folge, dass manche Tunnelvarianten gleich von vornherein ausgeschlossen werden konnten und nicht mehr weiter verfolgt werden mussten. Von den beobachteten Massenbewegungen werden hier drei kurz beschrieben:

1) Großräumige Hangrutschung westlich des Agua Negra Passes.

Es handelt sich um eine mit Ausdehnung von 3 x 3 km relativ großräumige Struktur. Sie liegt an der nördlichen Verlängerung jenes Störungssystems, das durch die Westwand des Cerro Olivares streicht und ist kausal an dieses angelegt (Abbildung 09). Eine Reihe von Quellen (zwei Beprobungen: Quellen 004 und 005 in Abbildung 19) entspringen am Fuß dieser Rutschung. Die Wässer zeigen eine relativ konstante elektrische Leitfähigkeit, die sich auch in kleineren Austritten zwischen den Quellen 004 und 005 wieder findet. Die beiden gezogenen Proben zeigen bei niedriger Mineralisierung einen Ca-Na-HCO₃-Typ. Quelle 004 wurde 2010 einer Isotopenbeprobung unterzogen (Nr. 2 in Abbildung 23 und 0). Sie besitzt mit ca. 4.400 bis 4.500 m ein lokales Einzugsgebiet, das deutlich unter dem Agua Negra Pass liegt.



Abbildung 09. Hangrutschung westlich des Agua Negra Passes, rote Markierung: Rutschung, blaue Markierung: Lage der Quellen. Blickrichtung Ost.

2) Felssturz in der Quebrada Olivares Norte.

Der Felssturz „San Lorenzo“ ist augenscheinlich aktiv, dafür spricht einerseits die Form des gefrorenen Schuttkegels, andererseits hört man häufig Steinschlag. Der Felssturz liegt an der Kreuzung einer NE-SW streichenden Störung des Sarmiento Systems und einer Störung, die parallel der Quebrada di San Lorenzo in WNW-ESE-Richtung verläuft. Ob der aktive Felssturz aus neotektonischen Bewegungen der Störungen oder aus einem stufenweisen Auftauen des Permafrosts durch den Klimawandel gesteuert wird, kann aufgrund der vorliegenden Ergebnisse nicht ausgesagt werden. Geht der Permafrost zurück (dies *dürfte* erwiesen sein, siehe HÖFER-ÖLLINGER & MILLEN, 2010, sowie SCHROTT, 1994), kommt es vor allem bei bestehenden Schwächezonen zu Felssturzereignissen. Das akkumulierte Felssturzmaterial nährt den dritten oben beschriebenen Blockgletscher.

3) Rutschung in der Quebrada di San Lorenzo.

Etwa 2 km vor der Mündung in die Quebrada Agua Negra liegt auf der rechten Talflanke eine Hangrutschung, die eine morphologische Stufe im Längsgefälle des Tales verursacht. Das Material der Rutschung, die etwa 1,5 km lang und im unteren Bereich ebenso breit ist, ist im einsehbaren Bereich ausschließlich hydrothermal und meteorisch alteriertes, teils völlig entfestigtes Gestein. Es liegt die Vermutung nahe, dass die Rutschung ihren Ursprung an derselben WNW-ESE-Störung wie der oben beschriebene Felssturz (Nr. 2) hat. Die Rutschung verursacht eine undeutliche Verebnungsfläche oberhalb im Talverlauf.

Alterationszonen

Es liegen zwei Typen von Alteration vor, hydrothermale und durch Verwitterung, die praktisch das gesamte Projektgebiet in unterschiedlicher Intensität betreffen.

Bei den Prozessen der hydrothermalen Alteration werden Minerale durch chemische Reaktionen umgewandelt. Ermöglicht wird dies durch die Zirkulation heißer Wässer.

Durch Alterationsvorgänge werden felsmechanische Kennwerte der Gesteine, wie z.B. die Druckfestigkeit, verändert.

Der Hauptgrund für die Erhöhung der Druckfestigkeit ist die mineralische Verfüllung der Klüfte oder die Rekristallisation von Quarz und Feldspat. Beide Phänomene wurden im Untersuchungsgebiet anhand von Dünnschliffuntersuchungen festgestellt und führten zu einem harten, spröden Verhalten des Gesteins.

Die argillische Alteration hingegen verringert die Druckfestigkeit der Gesteine, da sie Feldspäte in Tonminerale verwandelt. Dabei wird das Gestein auch stark zerlegt, was nahe der Oberfläche zu einer stärkeren Anfälligkeit gegenüber der Verwitterung führt.

Der Gehalt an Sulfiden in den Alterationszonen ist begrenzt, nur in wenigen Gesteinsproben konnten Sulfide festgestellt werden, ihr Anteil war dann kleiner 1 %.

Generell setzen sich Bereiche mit gegenüber der Verwitterung stark anfälliger hydrothermalen Alteration nur bis in geringe Tiefe fort. Dort, wo diese Bereiche auftreten, weisen sie eine starke Entfestigung auf. Im Bereich des geplanten Basistunnels kann man von einer maximalen Tiefenausdehnung der Entfestigung von 5-10 m unter dem Gelände ausgehen. Bereiche mit augenscheinlich extrem mächtigen Alterationen wurden bei der Trassie-

rung gemieden, wenngleich auch dort gemäß mündlicher Auskunft Prof. SIMON, Universität San Juan, von maximalen Tiefen im zweistelligen Meterbereich auszugehen ist.

Die bedeutenden Alterationszonen liegen einerseits an Störungszonen. Andererseits ist zu vermuten, dass sie sich seitlich im Bereich poröser andesitischer Laven, also Bereichen größerer hydraulischer Durchlässigkeit ausbreiten konnten. Dafür sprechen schichtparallele Einschaltungen von Alterationen in den Bohrproben, besonders deutlich in S06.

Die Verwitterung der Gesteine ist wenig intensiv, meist kryogen und spielt eigentlich nur in Bereichen mit signifikanten vorherigen hydrothermalen Alterationen eine Rolle. Es ist davon auszugehen, dass durchschnittlich bereits in einer Tiefe von 20 m unter Gelände kaum mehr Spuren der Oberflächenverwitterung festzustellen sind. Ausnahme bilden offene Klüfte, entlang derer die Verwitterung lokal begrenzt weiter eindringen kann.

Strukturgeologie und Tektonik

Die Interpretation der Tektonik des Projektgebietes basiert auf mehreren Grundlagen:

1. Geomorphologische Beobachtungen im Gelände bzw. von Satellitenbildern.
2. Darstellung in CHARRIER, 1973, worin von einer extensiven Tektonik seit etwa 10 Ma ausgegangen wird (in FRUTOS, 1981: erst seit 5 Ma).
3. Auswertungen von Epizentren von Erdbeben, die zeigen, dass im unmittelbaren Projektgebiet keine Kompression stattfindet (u.a. ANDERSON et al., 2007) und die kompressiven Bewegungen viel tiefer liegen.
4. Gespräche mit auf Neotektonik spezialisierte Geologen (z.B. Prof. WEIDMANN, Universität San Juan).

Die o.g. Quellen und die eigenen Beobachtungen führten zu der Annahme, dass im unmittelbaren Projektgebiet eine Horst-und-Graben-Struktur vorliegt. Wenn ein Gelände in mehrere pyramidenförmige Strukturen zergleitet, entstehen in Zwickeln Bereiche stärkerer Absenkung. Die Bewegungsflächen fungieren als Abschiebungen, wobei sie sich an vorhandenen Bruchzonen orientieren, welche durchaus auch fossile Aufschiebungsflächen darstellen können.

Die Vorstellung ist, dass es entlang vorhandener Störungen (ehemaliger Aufschiebungen) nach der pontischen kompressiven Phase wieder zu Abschiebungen kam. Eine Abwicklung der Deformationen erfolgte in SCHMID (2013).

Generell wurden im Gebiet drei wesentliche Störungsrichtungen festgestellt, die durch Verzweigungen ineinander übergehen können, und nach den Tälern benannt wurden:

1. Störungsrichtung San Lorenzo mit NW-SE bis WNW-ESE Orientierung, mit Einfallen Richtung Süd, der die San Lorenzo Schlucht und die sie begleitenden Störungen angehören, sowie etwas flussabwärts auch die Schlucht des Agua Negra Flusses.
2. Störungsrichtung Río Colorado, +/- N-S-streichend, mit steilem Einfallen sowohl nach Osten als auch nach Westen, der Passstraße und Agua Negra Fluss von der Einmündung der San Lorenzo Schlucht nach Norden folgend.

3. Störungsrichtung Sarmiento, NE-SW bis ENE-WSW streichendes, untergeordnetes Störungssystem.

Die festgestellten Störungen wurden vereinfachend diesen drei Systemen zugeordnet.

Im Bereich des Westportals des geplanten Basistunnels dominiert die N-S-verlaufende Río Colorado Störung die Westflanke des Cerro Olivares. Sie liegt im Bereich des Tunnelportals als etwa 60 Grad nach West einfallende Struktur mit zonalem Aufbau und zahlreichen Zweigstörungen vor. Es handelt sich um eine Abschiebung, wenngleich sie in geologisch früheren Zeiten als Aufschiebung aktiv gewesen sein muss. Auf den ersten Blick scheint es die westliche Talseite 2 km vertikal zur östlichen nach unten versetzt zu sein. Bei genauerer Betrachtung stellt sich dar, dass auf der westlichen Talseite dieselbe N-S-verlaufende Störung als eine nach Osten einfallende Struktur vorliegt. Sie ist dort in den geologischen Kartenwerken ebenfalls als Aufschiebung dargestellt. Damit könnte die Störung ein konjugiertes System sein, wobei dies mit den mehrfach wechselnden Abfolgen von kompressiven und extensiven Phasen nur schwer erklärbar ist. Im gesamten Gebiet wurden lediglich an zwei Stellen Aufschiebungen beobachtet, beide dürften fossil und inaktiv sein: Die nach Westen einfallende, in etwa Nord-Süd streichende und dem Río Colorado parallele Störung am Westhang des Cerro Olivares (Abbildung 10). Ferner eine flache Überschiebung mit wenigen Zehnermetern Versatz im Südhang des Cerro Sarmiento, oberhalb des Amphitheaters am Ende der Quebrada di San Lorenzo (Abbildung 11).



Abbildung 10. Situation am Olivares Westhang: Relikte einer einstigen Aufschiebung sind erkennbar.



Abbildung 11. Südhang des Cerro Sarmiento mit vermuteter Überschiebung.

Während die in Abbildung 10 dargestellte Aufschiebung am Westhang des Cerro Olivares nur ein fossiles Relikt darstellen kann, weil der Hangendblock nicht mehr vorhanden ist, könnte die in Abbildung 11 dargestellte Überschiebung zumindest aufgrund des Geländebefunds auch rezent sein.

Alle oben dargestellten tektonischen Überlegungen sprechen gegen eine rezente Überschiebung. Eine detaillierte tektonische Erklärung liegt noch nicht vor und ist auch in den nächsten Jahren nicht zu erwarten: Die einschlägige geologische Fachliteratur sieht vielmehr unterschiedliche und einander widersprechende Szenarien vor (ARMIJO et al., 2010 versus FARÍAS et al., 2010).

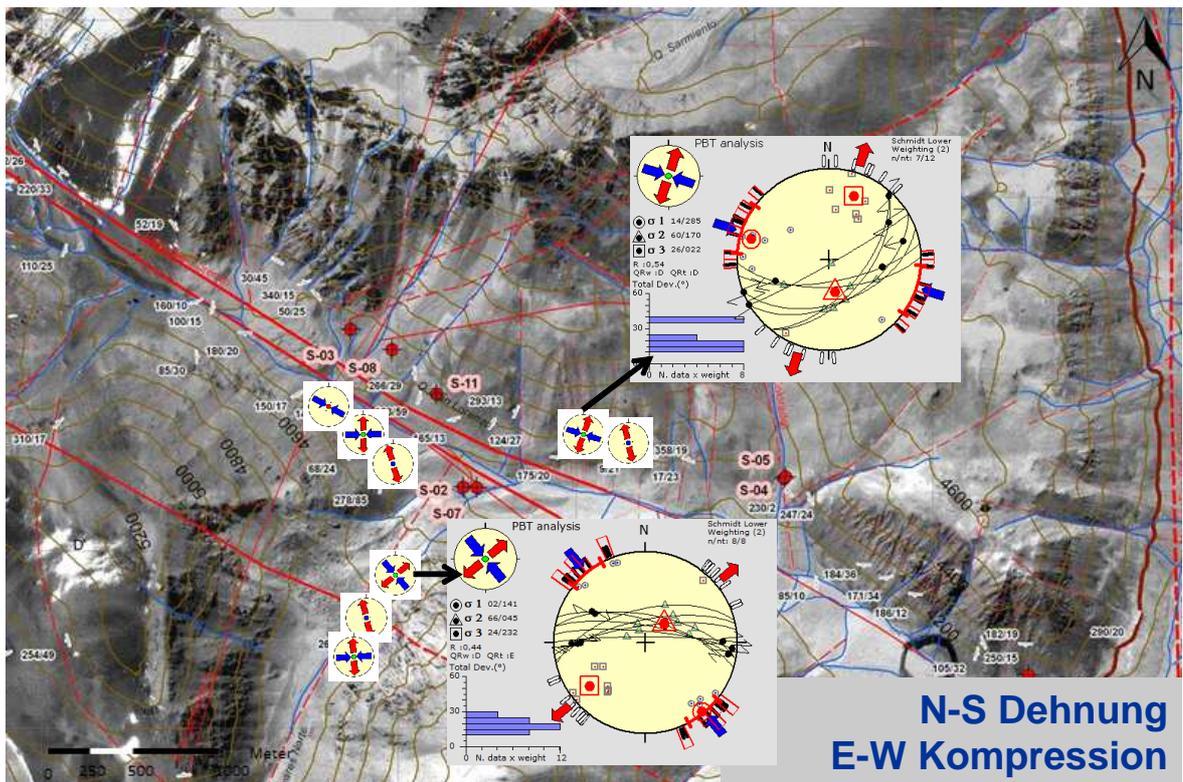
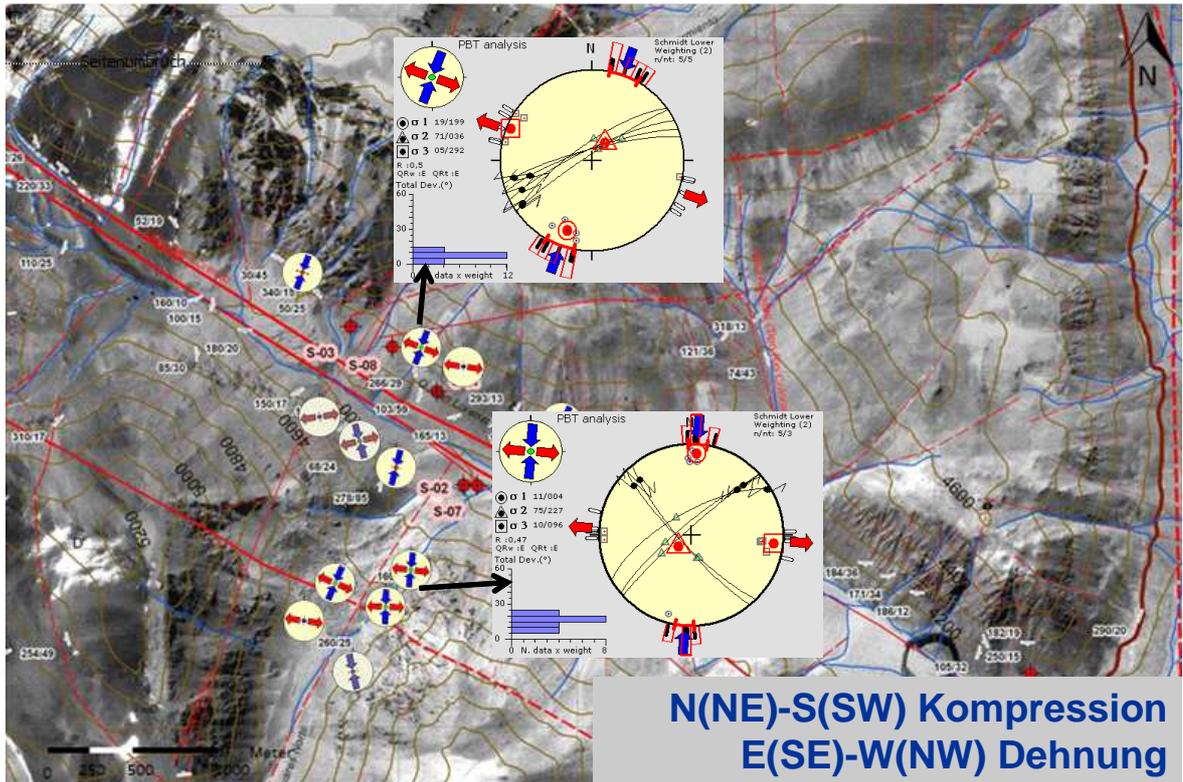
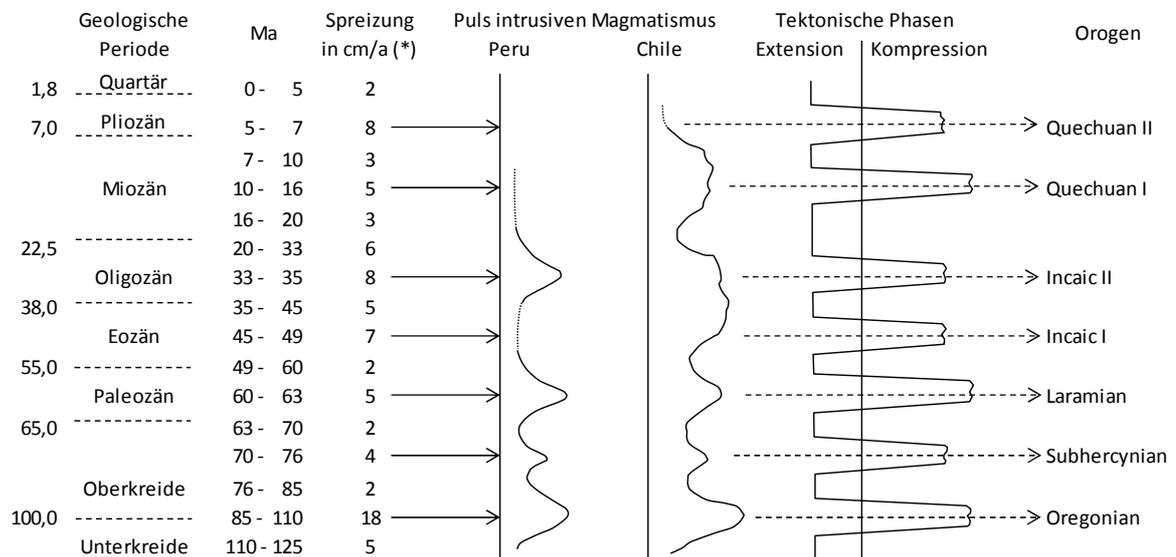


Abbildung 12. Paläostressanalyse auf Basis von Bewegungsindikatoren (Auswertung von Messungen von Strömung an Harnischflächen, aus SCHMID et al., 2012).

SCHMID (2013) zeigt in ihrer Paläostressanalyse, dass das kompressive Regime im Laufe der Erdgeschichte häufig um 90° gedreht hat (Abbildung 12), was mit CHARRIER (1973)

und FRUTOS (1981, Abbildung 13) konform geht. Diese Autoren verfolgten die Ansicht, dass die unterschiedlichen Subduktionsgeschwindigkeiten mit unterschiedlichen Gebirgsbildungsphasen in den Anden zusammenhängen. Dabei kommt es zu einem regelmäßigen Wechsel von kompressiver und extensiver Tektonik – das lokale Spannungsregime hat sich damit in geologischen Zeiträumen vielfach um 90° gedreht.



(*) - Für den Südostpazifik errechnet.

Abbildung 13. Verhältnis zwischen der Raten der Spreizung des Ozeanbodens und der orogenen Phasen der Anden (verändert aus FRUTOS, 1981).

Um den geologischen Aufbau der Störung im Bereich des vorgesehenen Westportals zu erkunden, wurden zwei Kernbohrungen (S-01a und S-10) mit einer jeweiligen Länge von 400 m abgeteuft. Die Bohrungen wurden als Schrägbohrungen mit 60° von der Horizontalen in Richtung Osten ausgeführt und bestätigten das geologische Modellkonzept, das eine Abfolge von quartärer Bedeckung, Kernzone, Randzone bis hin zu nahezu unbeeinflusstem Festgestein vorsah (Abbildung 14).

Die Agua Negra Störung verläuft ebenfalls in etwa N-S und liegt östlich des geplanten Ostportals. Geht man von einer Hochzone um den Cerro Olivares (6.200 m) und den Cerro Sarmiento (5.400 m) aus, von der die umliegenden Blöcke in der letzten tektonischen Phase gravitativ abgeglitten sind, ist die Agua Negra Störung (heute) ebenfalls als eine Abschiebung zu deuten, die gegen Ost einfällt.

Dasselbe gilt für die San Lorenzo Störung, in der die Abschiebung im Talschluss der Quebrada di San Lorenzo („Amphitheater“) direkt beobachtet werden kann (Abbildung 15). Die Orientierung liegt zwischen NW-SE bzw. WNW-ESE. Die Strukturen an der Oberfläche sind vertikal bis steil südfallend. Im Amphitheater fächert sie in mehrere Zweigstörungen auf, wobei je ein Hauptzweig nach Nordwesten und nach Westen verlaufen. Der Versatz der Abschiebung dürfte unterschiedlich hoch sein, mit dem geringsten Betrag (ca. 100-200 m) im Nordwesten. Nach Osten nimmt der Versatz mit einer Rotationskomponente zu. Die in Abbildung 15 dargestellten Winkeldiskordanzen in den vulkanischen Ablagerungen des Amphitheaters zeigen, dass die Quebrada di San Lorenzo entweder im Neogen angelegt oder zumindest zu dieser Zeit aktiviert wurde. Es handelt sich zudem um die

einzigste Schlucht im Projektgebiet, die eine andeutungsweise erkennbare glaziale Überformung erfahren hat und in Form einer Randmoräne glaziale Ablagerungen aufweist.

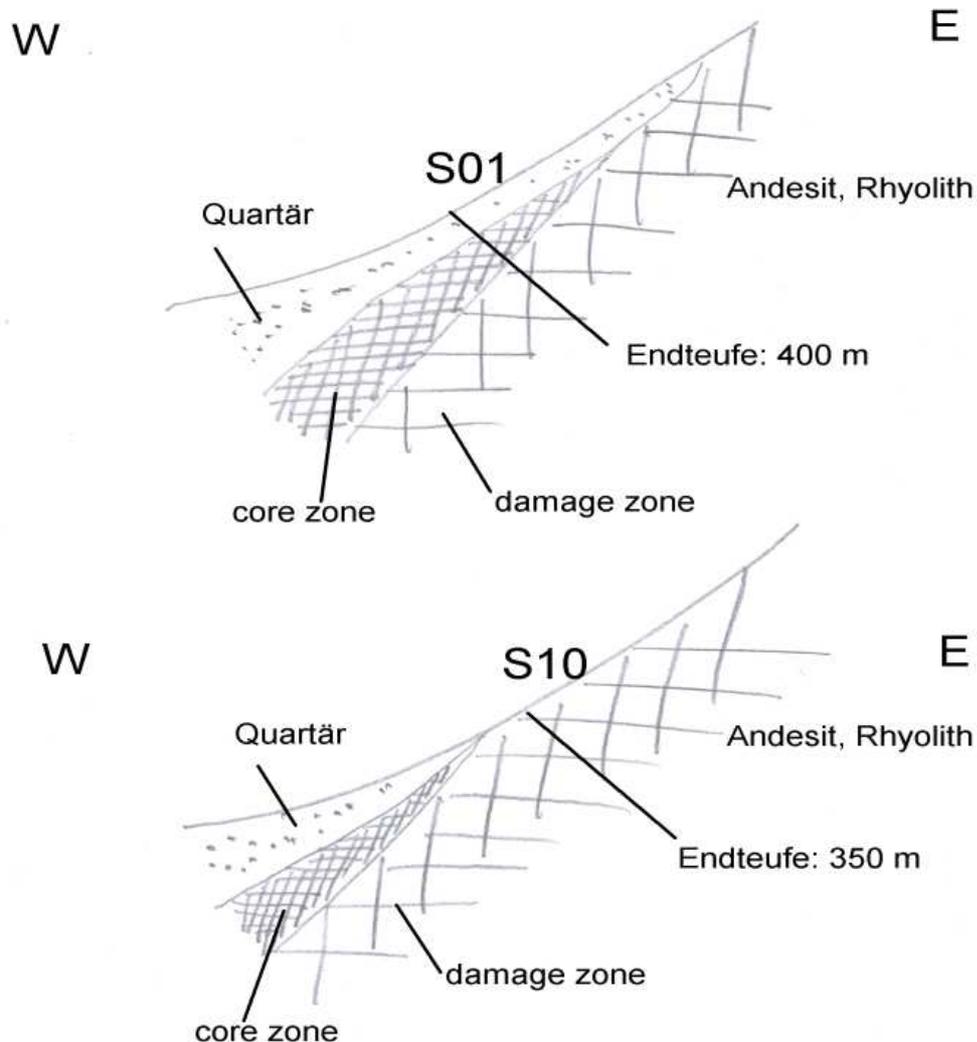


Abbildung 14. Schematische Skizze der Situation am Olivares Westhang (BRÜCKNER, 2010). Core zone: Kernzone; damage zone: Zerrüttungszone. S1 steht für S1a, die Lage der Bohrungen ist in Abbildung 20 dargestellt.

Die San Lorenzo Störung wurde mit der Bohrung S-02 (530 m, mit 45° nach NNE geneigt) erkundet, zudem ist für deren Erkundung die Bohrung S-09 vorgesehen.

Südlich der San Lorenzo Störung liegt eine Parallelstruktur, die den Auslöser für die Hangrutschung auf der rechten Talseite als auch für den Felssturz (der dann als Blockgletscher 3 ausgefroren ist) darstellt. Diese Struktur scheint an der Oberfläche steiler zu stehen als die Hauptstörung, nahezu vertikal.

Die Olivares Störung begrenzt das auf etwa 6.000 m liegende Hochplateau des Cerro Olivares im Osten. Die hier vorliegende Abschiebung zeigt augenscheinlich einen Versatz von knapp 1.000 m, wenngleich dieselbe Störung weiter nördlich und südlich wenig auffällig ist. Sie verliert sich vielmehr im Bereich des Amphitheaters der Quebrada di San Lorenzo und vereinigt sich unbedeutend mit dem NW-streichenden Ast der San Lorenzo Störung, oder streicht nach Nordwest in das Río Colorado Tal aus.

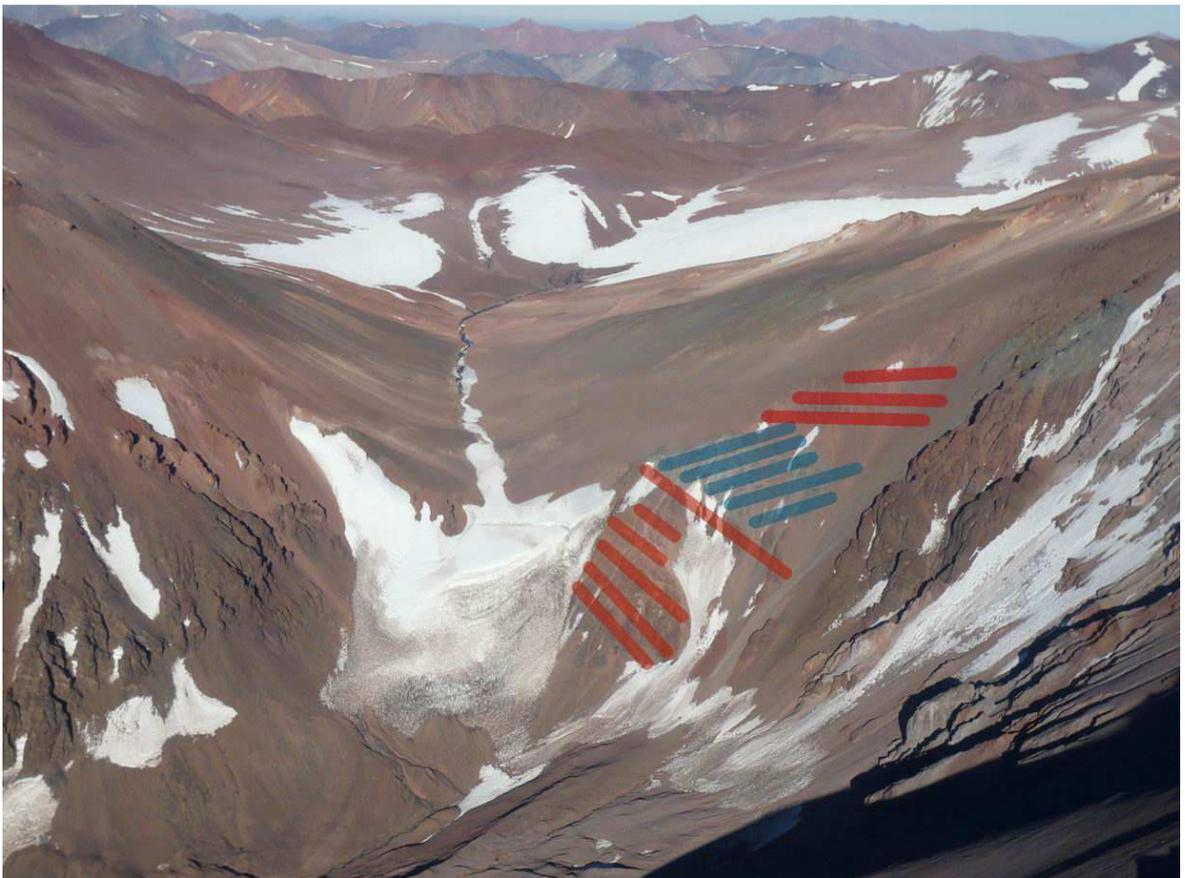
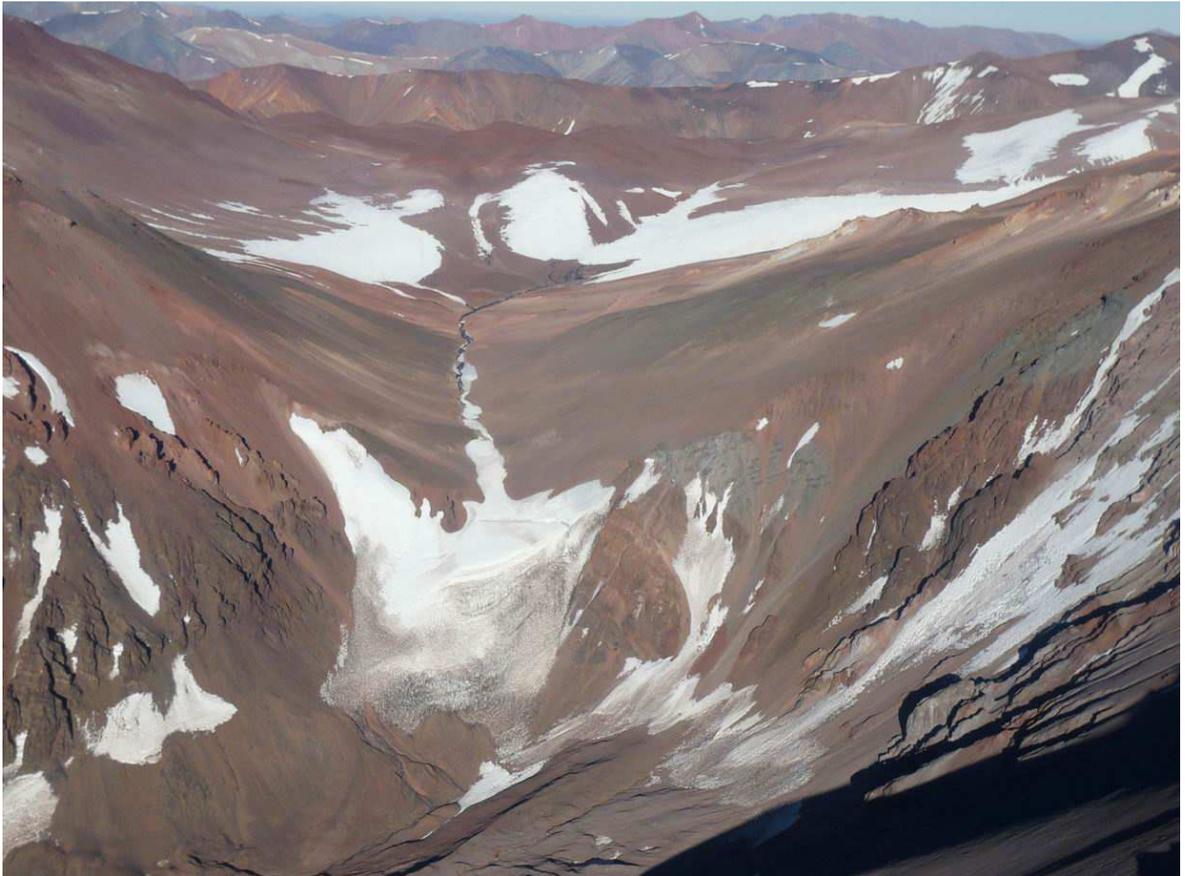


Abbildung 15. Abschiebung am Ende der San Lorenzo Störung. Blickrichtung West.

Im Bereich des Cerro Sarmiento liegt eine Reihe von kleineren Störungen vor, die SW-NE streichen und dessen Südostgrat quer durchschneiden. Für deren Erkundung wurde die Bohrung S-08 abgeteuft (vertikal, mit -630 m die bis dato tiefste Erkundungsbohrung für das Agua Negra Projekt).

Im Bereich der Quebrada Amarillo wurde eine N-S-streichende Störung (Río Colorado Typ) vermutet, die ebendiese Schlucht angelegt haben dürfte. Sie wurde mit der Bohrung S-04 (320 m, 60° nach West) erkundet. Die Untersuchung zeigte, dass die Kernzone der Störung hat eine Mächtigkeit im Meterbereich besitzt, die Randzone ist dagegen einige Zehnermeter mächtig.

Etwa 1,5 km weiter westlich liegt eine alte Störung desselben Typs (Nord-Süd, Río Colorado Typ) vor, die mit einem Lithologiewechsel einen beachtlichen Versatz aufzeigt: Während sich im Osten Andesite befinden, dominieren westlich der Störung Vulkanoklastische Gesteine.

Abgesehen von den beobachteten Hauptstörungen gibt es zahlreiche weitere Störungen, die nahezu vertikal einfallen. Die meisten davon sind älter prä-Miozän, d.h., sie streichen nicht in die tertiäre Formation Doña Ana, sondern enden an der Winkeldiskordanz.

Gesteinsarten

Die für das Tunnelbauvorhaben relevanten Gesteinsarten sind durchwegs vulkanischen Ursprungs (Abbildung 16).

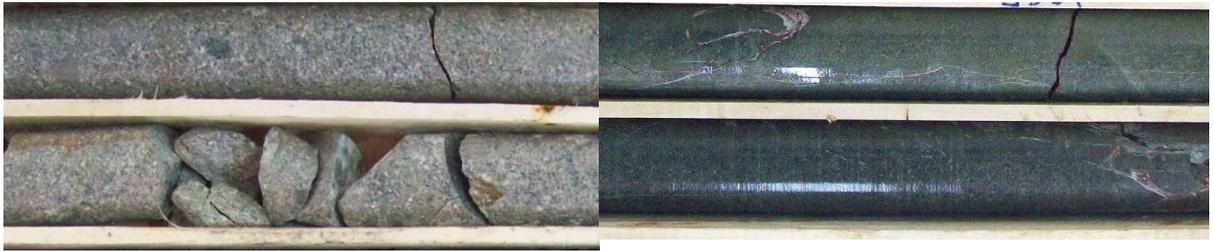
Art der Eruption / Sedimentation Chemie	Laven	Asche	Schmelztuff	Brekzien
Rhyolit	Porphyrischer Rhyolit	Rhyolitischer Tuff	Rhyolitischer Ignimbrit	Generelle Brekzien (nicht differenziert)
Dacit	Porphyrischer Dacit			
Trachit	Porphyrischer Trachit	Trachitischer Tuff	Trachitischer Ignimbrit	
Andesit	Porphyrischer Andesit			
Basalt	Basalt			

Abbildung 16. Gesteine der Choiyoi Gruppe. Kombination von Lithologie und Auswurfs- bzw. Ablagerungsbedingungen. Aus: HÖFER-ÖLLINGER et al. (2010).

12 Gesteinsarten, die als relevant für das Tunnelprojekt erachtet werden, sind in Tabelle 02 dargestellt.

Eine hypothetische Verteilung von Gesteinsarten der Choiyoi Gruppe sowie die Bedeckungen jüngerer Gesteine (Fm. Doña Ana, quartäre Gesteine) zeigt die Karte in Abbildung 17, eine mögliche Verteilung entlang des Agua Negra Tunnels zeigt das schematische Profil in Abbildung 18.

Tabelle 02 Die wichtigsten Gesteinsarten der Choiyoi Gruppe, die für den Agua Negra Tunnel definiert wurden.



Porphyrischer Andesit

Basalt



Tuffbrekzie

Vulkanische Brekzie



Porphyrischer Dazit

Ignimbritischer Rhyolith



Porphyrischer Rhyolith

Tuffitischer Rhyolith



Tuff allgemein

Ignimbritischer Trachyt



Porphyrischer Trachyt

Tuffitischer Trachyt

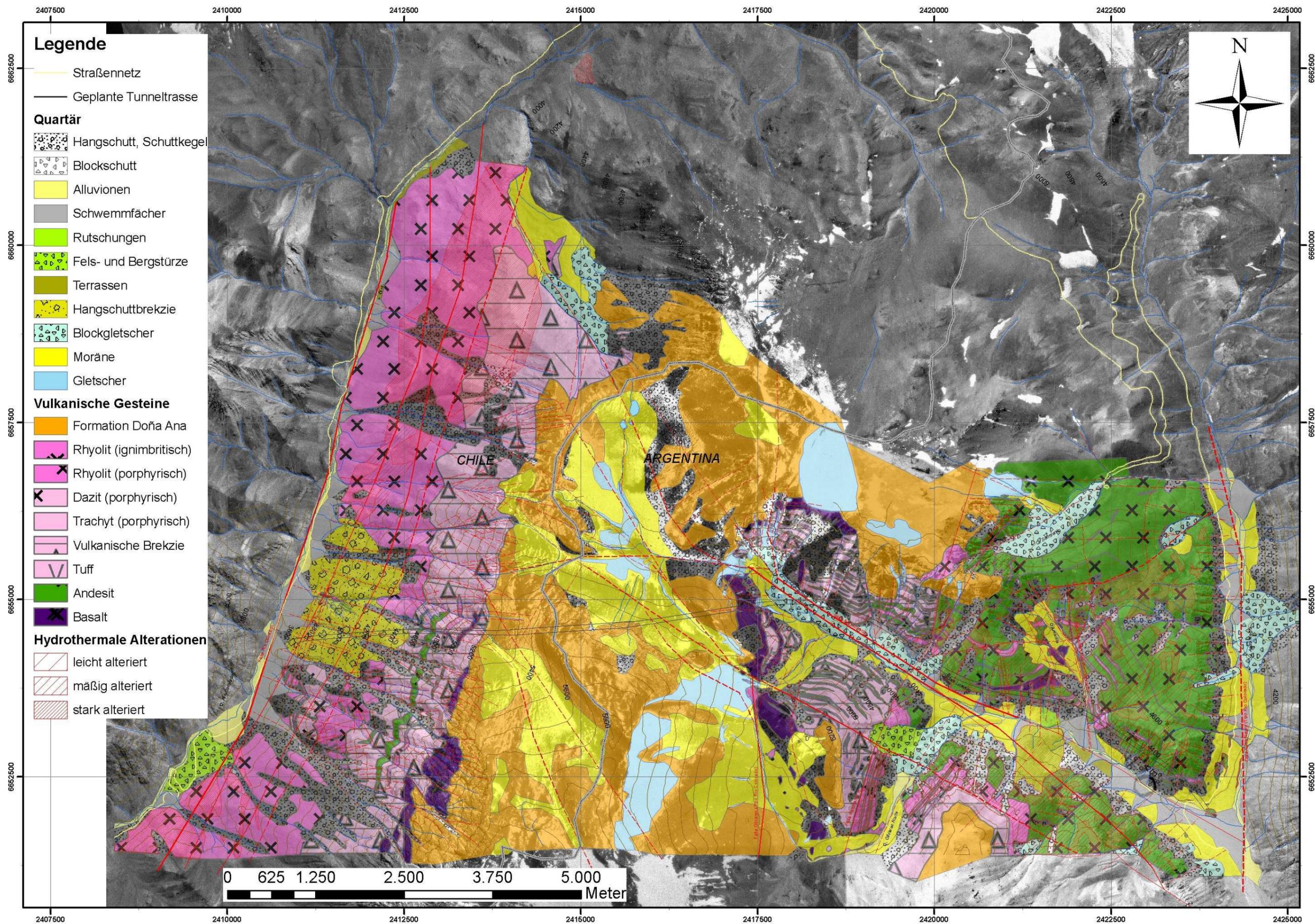


Abbildung 17. Vereinfachte geologische Karte des Agua Negra Tunnels, dargestellt im Maßstab 1:50.000 (vorhergende Seite). Die Karte zeigt an der Oberfläche vorwiegend Andesite im Osten und Rhyolite im Westen des geplanten Tunnels. Die Gesteine der tertiären Formation Doña Ana wurden nicht gesondert ausgewiesen. Zusammengestellt, ergänzt und kompiliert aus HÖFER-ÖLLINGER, 2008, HÖFER-ÖLLINGER et al. 2010 sowie BUREAU DE PROYECTOS E CONSULTORÍA LTDA. 2012.

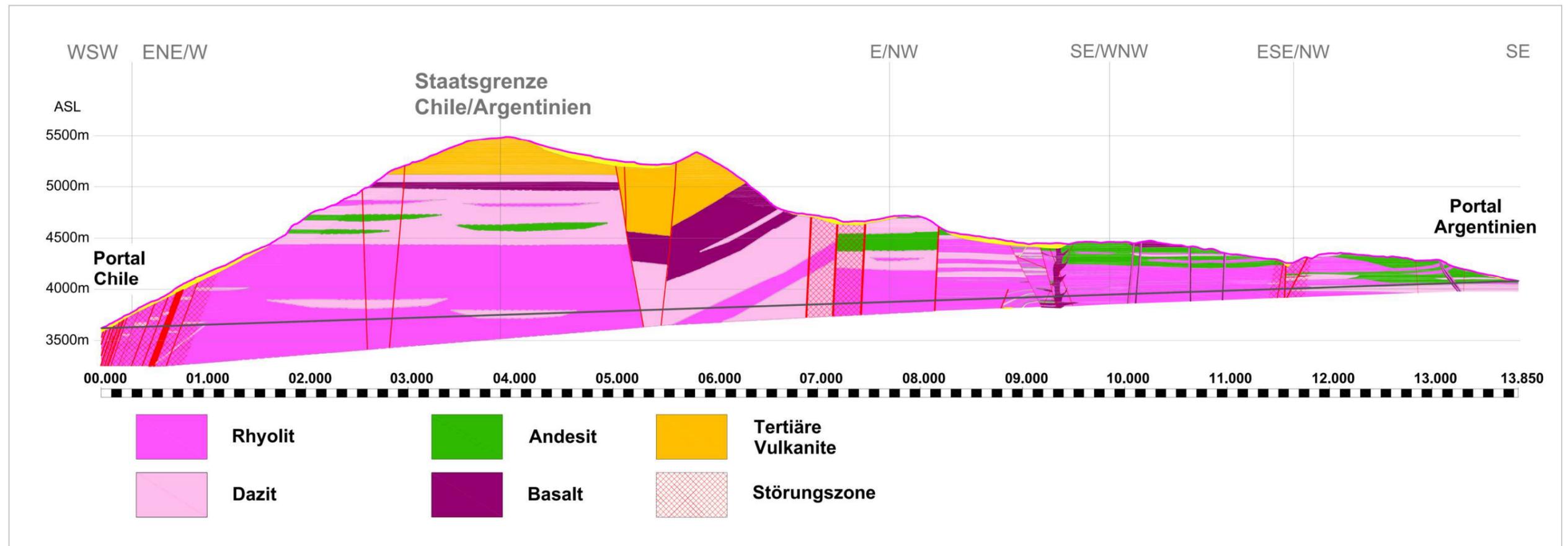


Abbildung 18. Vereinfachter und schematisierter geologischer Längenschnitt des Agua Negra Tunnels, ohne Maßstab, verändert aus: HÖFER-ÖLLINGER & MILLEN, 2010.

4.3 Hydrogeologie

Hydrographie

Die Trennlinie der Andenkordillere zwischen Chile und Argentinien stimmt mit der Hauptwasserscheide im Untersuchungsgebiet überein. Auf der chilenischen Seite des Projektgebietes ist der "Río Colorado" die wichtigste Vorflut. Er fließt im Projektgebiet etwa in Nord-Süd Richtung. Dieser Fluss wird nur durch wenige Zuflüsse gespeist. Die Zuflüsse von rechts überwiegen die von der linken Seite. Die größten Wassermengen liefert der Abfluss des Cerro El Tapado mit seinem Gletscher: Dieser erstreckt sich über eine Höhendifferenz von über 1000 m (SCHOTTERER et al. 2003). Auf der argentinischen Seite fließt das Oberflächenwasser über das Gerinne in der Quebrada di San Lorenzo und den "Río Agua Negra" ab. Sie entwässern den östlichen Sektor des hier zu betrachtenden Gebirgszugs.

Meteorologie

Die Niederschlagsmengen variieren zwischen 200 und 300 mm pro Jahr. Messungen bei der Mine „El Indio“ in Chile, die in relativer Nähe zum Projektgebiet liegt, verzeichneten im Zeitraum von 1981 bis 2003 ein Minimum von 27 mm und ein Maximum von 740 mm.

Die Jahresdurchschnittstemperaturen im Projektgebiet, in einer Höhe von 4000-4500 m, schwanken zwischen -2° und -3° C (nach SCHROTT 1994 und 2002).

Wasserbilanz

Die Wasserbilanz wurde in HÖFER-ÖLLINGER (2008) dargestellt. Auf Basis einer geschätzten Evapotranspiration von etwa 176 mm/a wird von einer Grundwasserneubildung von etwa 15 mm/a oder 0,5 l/(s·km²) ausgegangen. Der Oberflächenabfluss dagegen beträgt etwa 59 mm/a.

Geländeaufnahme

Die Aufnahme der Quellen und Bäche im Gebiet für den Agua Negra Tunnel (01-03/2008) zeigt eine starke Varietät der vor-Ort-Parameter. Sie weisen ein breites Spektrum elektrischer Leitfähigkeiten ($\kappa = 75$ bis 1830 $\mu\text{S}/\text{cm}$) und des pH-Wertes auf (pH = 4,6 bis 9, siehe auch Abbildung 19 bzw. Anhang 1).

Aufgrund des semiariden bis ariden Klimas tendieren Quellen mit geringer Schüttung oder Oberflächen aus kleinen und oberflächennahen Einzugsgebieten gegen Ende des Frühlings bzw. Anfang Sommer trocken zu fallen.

Alle Quellen haben an ihrer Austrittsstelle ihren Ursprung im Kolluvium, Alluvium oder glazialen Ablagerungen. Bei Austritten von Wasser mit hohen Mineralgehalten (zum Beispiel Quellen Nr. 011, 033) konnten Mineralablagerungen beim Austritt der Quelle festgestellt werden.

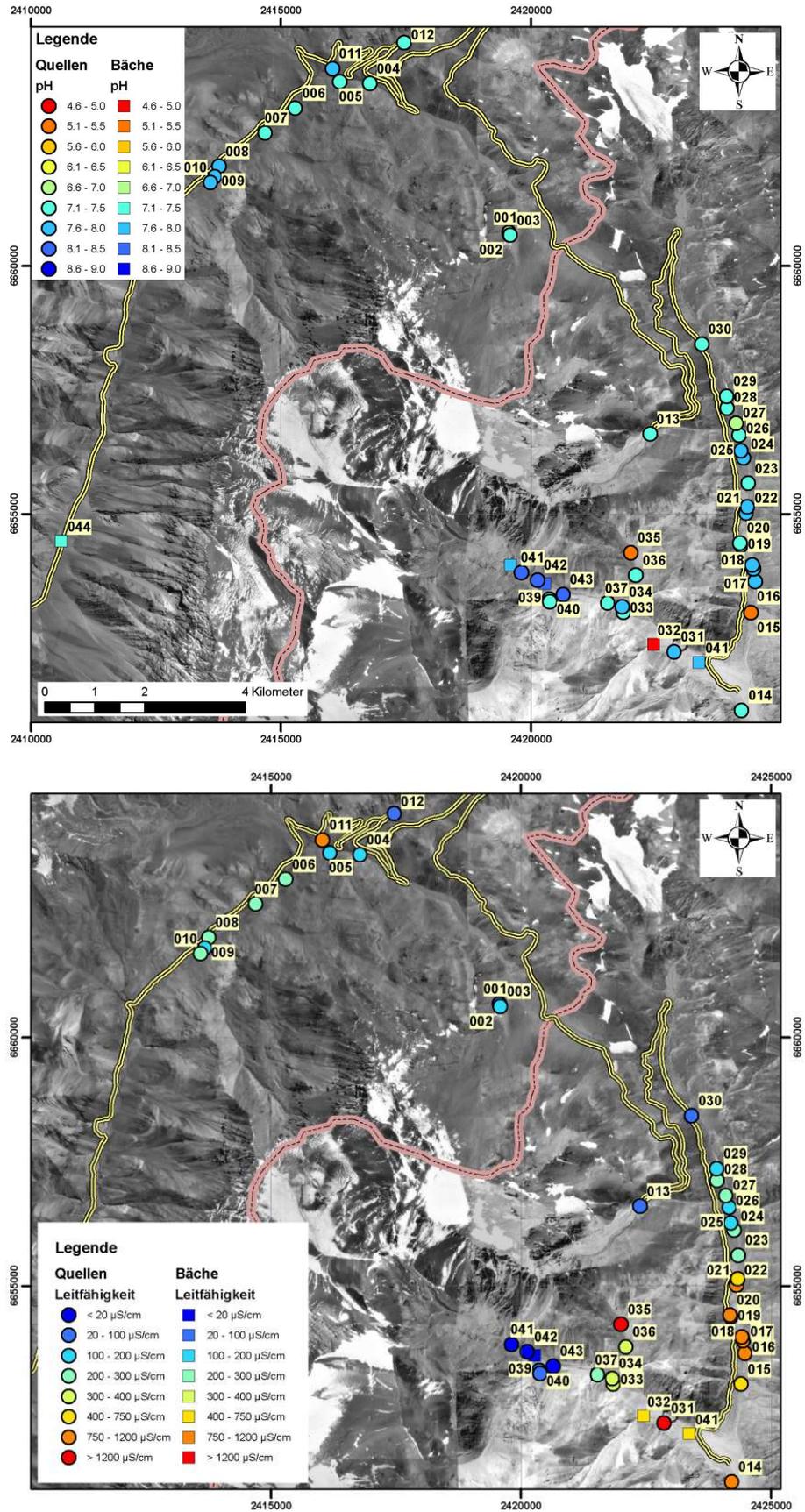


Abbildung 19. Lage der aufgenommenen Quellen beim Projekt Agua Negra Tunnel; pH-Wert (oben) und elektrische Leitfähigkeit.

Hydrochemie der Quellen und Bäche

Laborwerte und PIPER- und SCHÖLLER-Diagramme von Quellen und Bächen befinden sich im Anhang 3. Die Wässer lassen sich wie folgt charakterisieren:

- 1) Ca-Na-HCO₃, Na-Ca-HCO₃-SO₄ bis Ca-Na-HCO₃-SO₄, allgemein mit geringem bis mittlerem Lösungsinhalt ($\kappa < 250 \mu\text{S/cm}$) und mit bedeutendem Magnesium- (10 bis 20 %meq/l) und Chlorgehalt (5 bis 15 %meq/l).
- 2) Ca-HCO₃ bis Ca-HCO₃-SO₄ oder Ca-SO₄-HCO₃, allgemein mit geringem bis mittlerem Lösungsinhalt, ($\kappa < 250 \mu\text{S/cm}$) und bedeutenden Konzentrationen an Natrium (10 bis 20 %meq/l) und Chlor (5–15 %meq/l).
- 3) SO₄, Na-HCO₃-SO₄ bis Ca-Mg-SO₄, mit leicht erhöhtem Lösungsinhalt ($\kappa = 500$ bis 1850 $\mu\text{S/cm}$) und bedeutender Natriumkonzentration (5 bis 10 %meq/l)

Die Gewässertypen 1) und 2) hängen mit der inkongruenten Hydrolyse von hauptsächlich Silikaten (Feldspäte, Glimmer) aus Vulkaniten zusammen und nur in geringerem Ausmaß mit der Lösung von Kalziumkarbonat. Die Wässer vom Typ Ca-SO₄, Na-HCO₃-SO₄ bis Ca-Mg-SO₄ stammen größtenteils aus Bereichen mit deutlicher hydrothermalen Alteration, in denen Eisen- und Manganoxide sowie Schwefelminerale (z.B. Pyrit) festgestellt wurden. Dies lässt darauf schließen, dass die erhöhten Schwefel- und Metallgehalte dieser Quellen mit der Oxidation und Auswaschung der Schwefelminerale in Verbindung stehen. Gelegentlich wurde in hydrothermal alterierten Bereichen auch die Ablagerung von sekundärem Gips in den Wasserläufen beobachtet.

Hydrochemie der Bohrungen

In Anhang 2 sind die in den Wasserproben aus den Bohrungen gemessenen Parameter (elektrische Leitfähigkeit, Temperatur, pH und Wassertyp) zusammenfassend dargestellt. Die Proben wurden während der Pumpversuche in den Bohrungen (Lage: Siehe Abbildung 20) gezogen. Die hydrochemischen Daten sind in Abbildung ii in Anhang 4 aufgetragen.

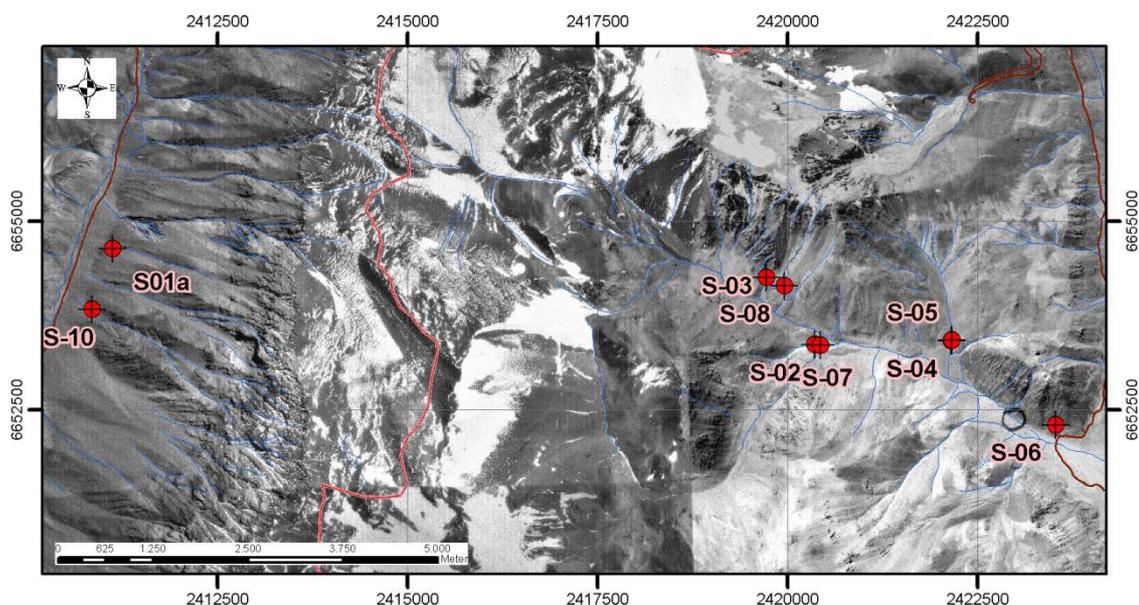


Abbildung 20. Lage der Bohrungen für den Agua Negra Tunnel.

Die Wässer in S-03 sind – mit einer Ausnahme – alle vom Typ Na-Ca-Mg-HCO₃, unterschiedlich stark mineralisiert ($\kappa = 352$ bis $918 \mu\text{S/cm}$).

Die Analysen an Proben der Bohrung S-04 zeigen Wässer vom Typ Ca-Mg-Na-SO₄, die einen hohen Lösungsinhalt besitzen ($\kappa = \sim 1500$ bis $2500 \mu\text{S/cm}$).

Offensichtlich variieren Typ und Lösungsinhalt der Wässer in Bohrung S-05. Die elektrische Leitfähigkeit reicht von 330 bis $3234 \mu\text{S/cm}$, die Gewässertypen sind Ca-Na-SO₄-HCO₃-Cl, Mg-Ca-Na-SO₄, Ca-Mg-Na-SO₄ und Mg-Ca-SO₄.

Wie bei S-05 zeigen auch die Wässer in S-07 große Variationen beim Chemismus. Es wurden Na-Ca-SO₄, Ca-Na-Mg-SO₄-HCO₃ und Ca-Na-SO₄-HCO₃-Wässer festgestellt. Die Mineralisierung ist relativ gering (κ liegt zwischen 389 und $576 \mu\text{S/cm}$).

Aus Bohrung S-06 wurde nur eine Probe gezogen (Ca-Na-Mg-SO₄). Aus den Bohrungen S-02 und S-08 wurden keine Wasserproben gezogen, da in diesen Bohrungen keine Pumpversuche durchgeführt wurden.

Von den Bohrungen in Chile, S-01a und S-10, wurden insgesamt 12 Proben (je 3 Proben bei insgesamt 4 Pumpversuchen) gezogen. Es handelt sich um Na-Ca-Mg-HCO₃-SO₄-Wässer bzw. um den Na-Mg-Ca-HCO₃-SO₄-Typ, bei relativ starker Mineralisierung ($\kappa = 400$ bis $1.760 \mu\text{S/cm}$; BRÜCKNER, 2010).

Das in den Bohrungen angetroffene Grundwasser ist den Quellen und Bächen ähnlich. Auch hier stehen die Wässer vom Typ Ca-Na-HCO₃ und Na-Ca-Mg-HCO₃ mit der inkongruenten Hydrolyse der wichtigsten Silikate (Feldspäte, Glimmer) aus Vulkaniten in Verbindung und nur in geringerem Ausmaß mit der Lösung von Karbonaten. Das gleiche gilt für Wässer des Typs Ca-Mg-SO₄ und Ca-Na-Mg-SO₄, die sich in Grundwasserleitern entwickelten, die von einer deutlichen hydrothermalen Alteration geprägt sind, wo Eisen- und Manganoxide sowie Schwefelminerale wie Pyrit vorliegen. Dies legt die Vermutung nahe, dass der relativ hohe SO₄-Gehalt in diesen Wässern mit der Oxidation von Schwefelmineralen zusammenhängt.

Die aus hydrochemischer Sicht relativ einheitlichen Daten, die innerhalb weniger Tage und bei verschiedenen Versuchen in Bohrung S-04 aufgenommen wurden, zeigen, dass der oder die angebohrten Grundwasserleiter keine chemischen Variationen aufweisen. Allerdings zeigen die Bohrungen S-03, S-07 und besonders S-05 chemische Variationen, was darauf hindeutet, dass diese eine Reihe von Grundwasserleitern durchörtern.

Hydrochemischer Vergleich der Wasserproben aus Bohrungen, Quellen und Bächen

Abbildung iii im Anhang 4, Abbildung 21 und Abbildung 22 zeigen Grafiken, welche die hydrochemischen Daten der Wasserproben aus Quellen, Bächen und Bohrungen im Projektgebiet miteinander vergleichen. Die Daten der Bohrungen, Quellen und Bäche zeigen dabei die gleiche Mischungslinie, was auf einen ähnlichen geochemischen Ursprung der verschiedenen Wassertypen schließen lässt. Die Proben aus den Bohrungen weisen generell einen höheren Lösungsinhalt auf als die Proben aus Bächen und Quellen. Im Festgestein gibt es kein aktives, vernetztes System mit starken Fließbewegungen in der Tiefe, es handelt sich um stagnierendes Grundwasser.

Einige Quellen haben einen im relativen Vergleich hohen Lösungsinhalt. Dies bedeutet, dass sie von (älteren) Wässern der Festgesteins-Grundwasserleiter gespeist werden könnten. Das sind vor allem Quellen, die offensichtlich nahe regionaler Störungen entspringen, wie die Quellen 035 und 036 in der Quebrada Amarilla, sowie die Quellen 015, 016, 017, 018, 019, 020, 021 und 022 nahe der N-S-orientierten Agua Negra Störung.

Auf Abbildung 21 ist Calcium und Magnesium gegen Hydrogenkarbonat aufgetragen. Die Lage der Mischungslinie 1 (gelb) deutet darauf hin, dass in den Grundwasserleitern Karbonate gelöst werden. Die Lage der Mischungslinie 2 (magenta) hängt mit reiferen Wässern (durch inkongruente Hydrolyse von Silikaten in vulkanischen Gesteinen) und der Oxidation von Schwefelmineralen zusammen. Die Streuung entlang der Mischungslinie 2 ist groß und zeugt davon, dass mehrere Prozesse eine Rolle spielen. Zudem zeigt sich, dass die Wässer aus den Bohrungen allgemein einen größeren Lösungsinhalt besitzen (bedingt durch größere Verweilzeit im Grundwasserleiter). Abbildung 22 zeigt, dass die Herkunft des Sulfats in allen Grundwasserleitern die gleiche ist. Sie ist auf Oxidation von Sulfiden zurückzuführen.

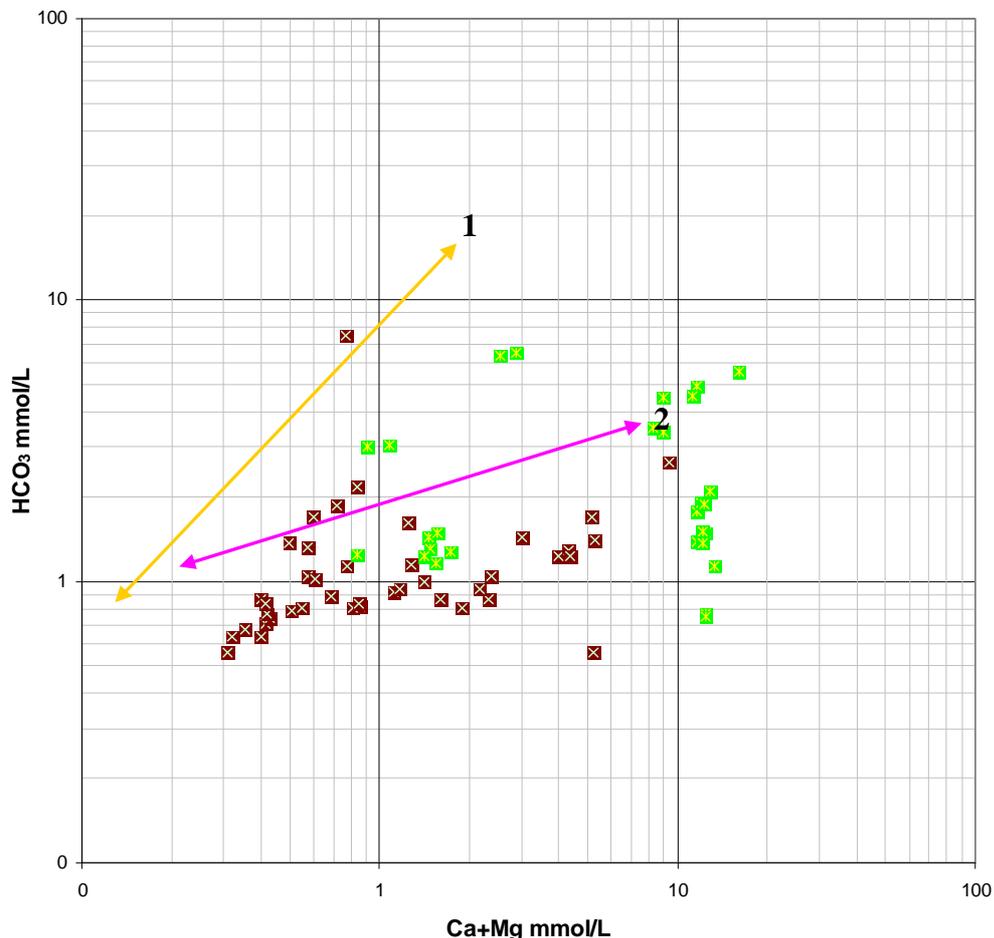


Abbildung 21. Ca+Mg-Gehalte gegen HCO_3^- -Gehalt der Wasserproben aus den Bohrungen (grüne Quadrate mit gelben Kreuzen) und Quellen/Bäche (braune Quadrate mit türkisfarbenen Kreuzen).

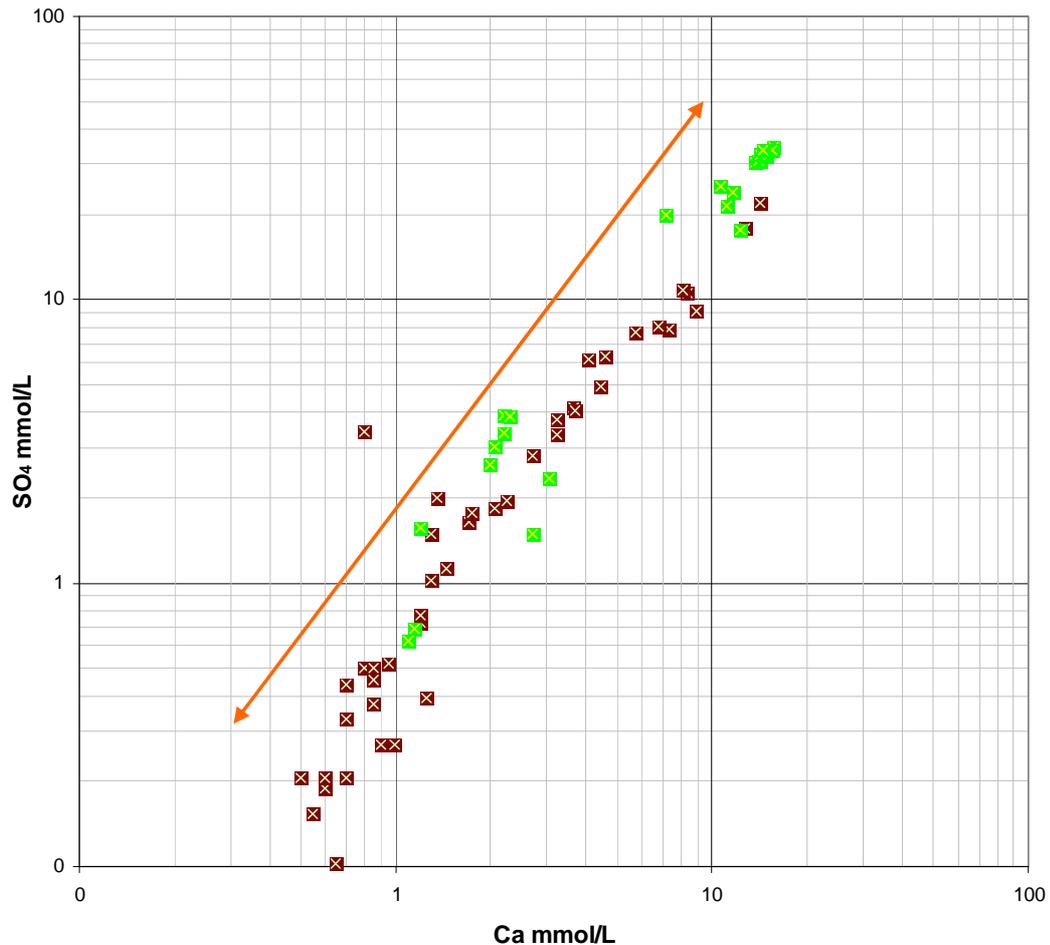


Abbildung 22. Ca- gegen SO_4 -Gehalt der Wasserproben aus den Bohrungen (grüne Quadrate mit gelben Kreuzen) und Quellen/Bächen (braune Quadrate mit türkisfarbenen Kreuzen).

Isotopenhydrologie

Im Bereich Agua Negra Pass sowie bei der Goldlagerstätte Pascua Lama, bei der Mineralquelle von Guañizüil, im Bereich des Corredor Bioceánico Aconcagua (Kapitel 5) sowie im Cañon del Atuel im Süden der Provinz Mendoza wurden Proben für Isotopenanalytik gezogen. Die Ergebnisse wurden in HÖFER-ÖLLINGER & MILLEN (2013) bestehenden Studien gegenüber und zur Diskussion gestellt.

Frühere Studien liegen von VOGEL (1972, 1975), PANARELLO et al. (1993) sowie in Form der Publikation der INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (2009) vor. Es zeigt sich, dass der Höheneffekt regional stark unterschiedlich ist. Die Steigung liegt zwischen 0,2 und 0,3 ‰. Auch die absoluten Werte unterscheiden sich, sodass keine allgemein gültige Aussage für die Anden getroffen werden kann. Die eigenen Werte beziehen sich auf Probenahmen auf 29°, 30°, 32° und 34° südlicher Breite, wobei für den 29. (Pascua Lama) und den 30. Breitengrad (Agua Negra) eigene Höheneffekte dargestellt werden konnten (Abbildung 24). Die Lage der entnommenen Proben ist in Abbildung 23 dargestellt.

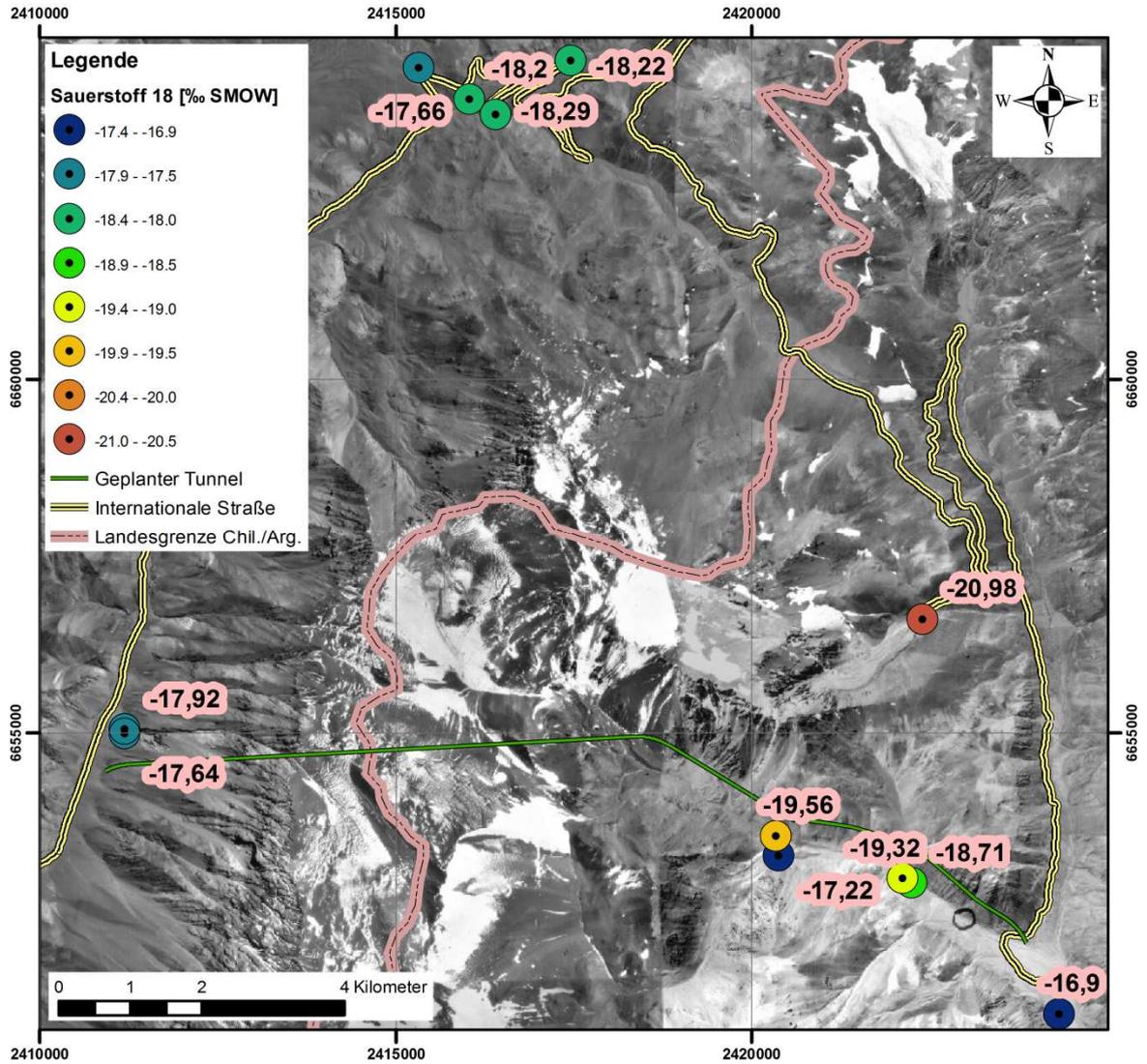


Abbildung 23. Lage der Isotopen-Messstellen am Agua Negra Pass und Werte einer Stichtagsmessung vom Februar 2010, verändert aus HÖFER-ÖLLINGER (2011).

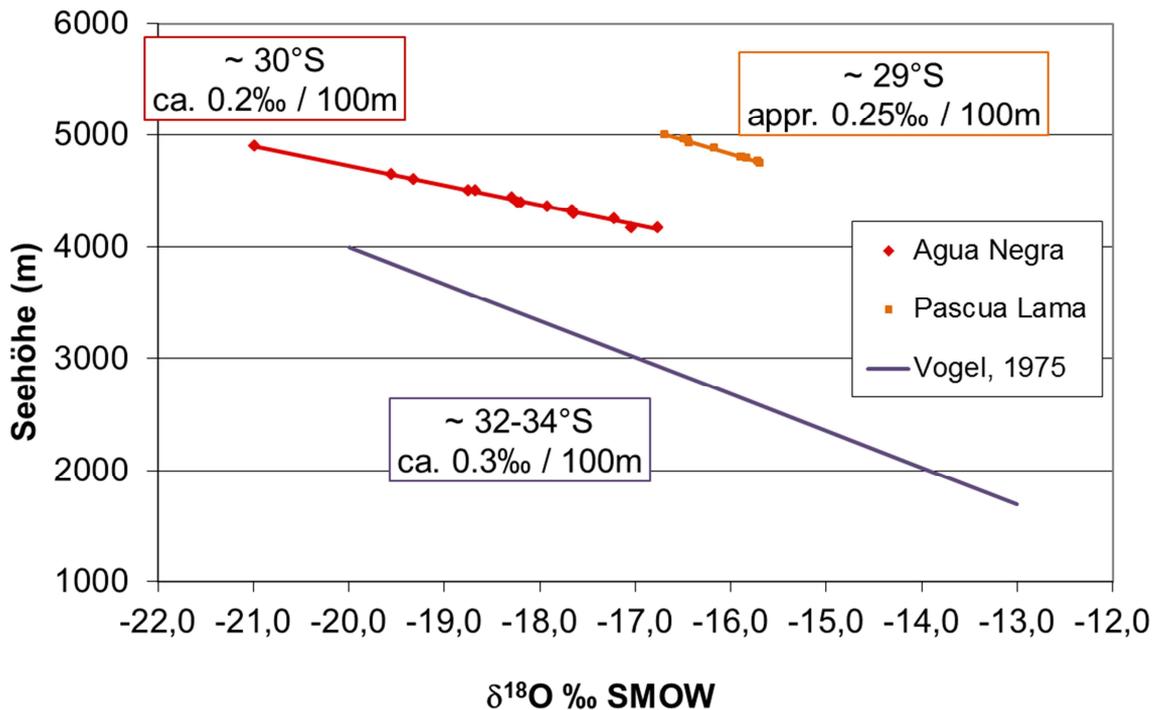


Abbildung 24. Höhenabhängigkeit von stabilen Isotopen in verschiedenen Breitengraden. Verändert, aus HÖFER-ÖLLINGER & MILLEN (2013).

4.4 Wasser-Zutrittsprognose

Das Hauptgeschehen des unterirdischen Abflusses im Untersuchungsgebiet ist dominiert von Poren-Grundwasserleitern, die sich in den quartären Ablagerungen (alluvial, glazial, kolluvial, Ablagerungen von Massenbewegung, etc.) der Talsohlen befinden. Entlang der Quebrada San Lorenzo und ihrer Nebentäler variiert die Mächtigkeit der alluvialen Sedimente zwischen 0 und 100 m. Das anstehende Festgestein ist stellenweise in den Flussbetten aufgeschlossen. Die glazialen und kolluvialen Ablagerungen sowie Ablagerungen aus Massenbewegungen, die an den Steilhängen überwiegen, erreichen Mächtigkeiten von mehr als 100 m. Bei den Erkundungen wurden sie bis -90 m erbohrt (S-02, S-08). Viele dieser Ablagerungen – vor allem vom Bereich der Bohrung S-02 talaufwärts bis zum „Amphitheater“ am Ende des Tales – sind durchgefroren und weisen teils eine ausgesprochene Blockgletscherdynamik auf. Dazu gehören in hydrogeologischer Hinsicht die nachfolgenden Phänomene:

- Der Niederschlag erfolgt – unabhängig von der Jahreszeit – in fester Form. Er spielt bei der Entwicklung eine untergeordnete Rolle, wichtiger für die Alimentierung der Blockgletscher sind Lawinen aus Schnee, Eis und Schutt.
- Oberflächennah erfolgt auf dem Blockgletscher sommerliches Auftauen (maximal bis 2 m unter Gelände), dort findet auch Grundwasserabfluss statt.
- Die Auftauschicht liegt meist an der Sohle des Blockgletschers. Nur in Ausnahmefällen liegt sie darüber in den Lockermassen oder darunter im Festgestein.

- Liegt die Auftauschicht im Lockergestein, ist darunter ein Porengrundwasservorkommen zu erwarten. Mitunter können hier auch ungesättigte Bereiche vorliegen.
- Durch Thermokarstentwicklungen entstehen Dolinen mit teils periodischen Seen. Ein größerer Thermokarstsee auf dem Blockgletscher Quebrada di San Lorenzo befindet sich etwa 800 m oberhalb der Trasse des Agua Negra Tunnels.

Im Norden des Untersuchungsgebietes entspringen die Quellen 004 bis 010 aus Grundwasserleitern, die sich in einer großen Massenbewegung gebildet haben (Abbildung 09). Im Südosten des Untersuchungsgebietes liegen im Umkreis von einem Kilometer um das Ostportal Quellen und Gewässern mit relativ hohem Lösungsinhalt vor (014-022 und 031). Sie entspringen aus dem Kolluvium und aus alluvialen Fächern, sowie aus Ablagerungen von Massenbewegungen (033, 034, 037), die wiederum vor allem aus Sedimenten mit Klasten hydrothermal alterierter Protolithe bestehen. Der hohe Lösungsinhalt dieser Quellwässer zeigt an, dass Teile aus Kluffgrundwasser stammen können. Quellen, die zumindest teilweise aus regionalen Störungssystemen entspringen, dürften die Quellen 035 und 036 in der Quebrada Amarilla und die Quellen 015, 016, 017, 018, 019, 020, 021 und 022 in der Nähe der regionalen, N-S-orientierten Agua Negra Störung darstellen.

Nur wenige Tests der Bohrkampagne 2009 in Argentinien bieten verlässliche Werte für Ergiebigkeit und Durchlässigkeit des Gebirges. Plausible Messergebnisse aus Pumpversuchen in Bohrungen, die Störungen durchörterten, liefern Werte für die hydraulische Durchlässigkeit in der Größenordnung von $k_f = 10^{-8}$ bis 10^{-7} m/s.

2010 durchgeführte Pumpversuche in Chile sind aufgrund von Verbesserungen hinsichtlich Dokumentation und Durchführung seitens der ausführenden Firma auswertbar. Die Pumpversuche wurden in zwei Bohrungen durchgeführt und in BRÜCKNER (2010) untersucht.

Dabei wurden die Pumpversuche unter Berücksichtigung von brunnenspezifischen Einflüssen, insbesondere der Brunnenspeicherung, bewertet und ein hydraulisches Modell des Grundwasserleiters in Übereinstimmung mit den geologischen Gegebenheiten erstellt.

Während des Abteufens der Bohrungen wurden ein bzw. zwei Mal der Bohrfortschritt zu Gunsten eines Pumpversuches unterbrochen. Damit können Kennwerte für verschiedene Abschnitte der Bohrung ermittelt werden. Diese Teilabschnitte sind in Tabelle 03 dargestellt.

Bei beiden Bohrungen bildet sich beim Wiederanstieg des Wassers eine Staugrenze ab. Aufgrund der ermittelten Parameter ist der Grundwasserleiter als relativ homogen anzusehen.

Das Gestein um die Bohrung S-01a ist – im relativen Vergleich zur Bohrung S-10 – weniger stark zerlegt, beziehungsweise weist geringere Klufföffnungen auf oder die Klüfte sind durch Feinmaterial verfüllt.

Diese Werte aus dem Portalbereich in Chile liegen etwas höher als die in Argentinien ermittelten, was mit der starken Zerrüttung des Gebirges aufgrund der nahen Störungszone zusammenhängt.

Tabelle 03 Zusammenfassung der Pumpversuchsergebnisse, die im Portalbereich in Chile in den Bohrungen S01a und S10 durchgeführt wurden.

Bohrung		S-01a	S-01a	S-01a	S-10	S-10
Datum		23.02.10	16.03.10	16.05.10	17.04.10	06.05.10
Endteufe [m]		100,0	224,6	400,9	228,1	351,5
Dauer der Pumpstufen [s]	1.	630	3.550	5.440	3.070	2.405
	2.	-	2.385	5.710	3.005	2.400
	3.	-	2.635	21.375	2.990	2.395
Pumprate nach Pumpstufe [l/min]	1.	60	30	12	15,5	11,9
	2.	-	45	24	30,3	24,6
	3.	-	60	36	37,9	36
Maximale Absenkung (m)		58,1	62,4	37	3,8	2,9
Transmissivität T (m ² /s)		8,5 E-7	1,3 E-5	2 E-5	3,1 E-4	4,1 E-4
Durchlässigkeit k _f (m/s)		1,3 E-8	6,8 E-8	5 E-8	2,4 E-6	1,6 E-6
Durchlässigkeit k _f * (m/s)		1,3 E-8	9,3 E-8	4 E-8	2,4 E-6	7,9 E-7

* Unter Berücksichtigung von $T = \sum K_{fi} \cdot H_i$

Die Überprüfung der geophysikalischen Profile und der Bohrkerne zeigt, dass die Mehrheit der Störungzonen, die in den Bohrungen angetroffen wurden, eine Breite zwischen einem und 10 m haben (z.B. S-02). Die maximale Breite für Störungzonen, die in einer Bohrung festgestellt wurde, liegt bei ca. 25 m (S-03, S-10).

Die Bohrkerne zeigen wenig Hinweise auf bedeutende Wasserzirkulation im Bereich des Tunnels, wie etwa oxidierte oder fleckige Trennflächen-Oberflächen. Bei den Bohrungen S-03 und S-08 ist unterhalb von 230 m bzw. 200 m Tiefe keine Oxidation mehr feststellbar. Diese Feststellung stimmt mit den Ergebnissen der hydrochemischen Analytik überein. Damit sind durch die Erkundungen keine bedeutsamen aktiven Fließsysteme auf Tunnelniveau festgestellt worden. Dies schließt nicht aus, dass beim Tunnelvortrieb Störungzonen mit lokal begrenzter höherer Transmissivität angetroffen bzw. angebohrt und entwässert werden können. Dann sind temporär größere Schüttungsmengen möglich.

Die Gleichungen von GOODMAN et al. (1965) und JACOB & LOHMANN (1952) sind unter der Annahme gültig, dass es sich um einen ungespannten Grundwasserleiter handelt. Dieser muss ein homogenes, isotropes und poröses Medium besitzen in dem das Darcy-Gesetz gilt. Deshalb stellen die Berechnungen nur eine Abschätzung der Größenordnung der initialen Infiltrationsrate für einfache Fälle dar. Der maximale Grundwasserfluss oder die Grundwasser-Neubildungsrate eines Gebietes kann ebenso genutzt werden, um ein ungefähres Maximum für stationäre Bedingungen abzuschätzen, als auch für eine Abschätzung der Infiltration in den Tunnel auf lange Sicht. Die Infiltrationsphasen während

der Übergangsphase wurden nicht betrachtet, befinden sich aber zwischen den beiden Extremen.

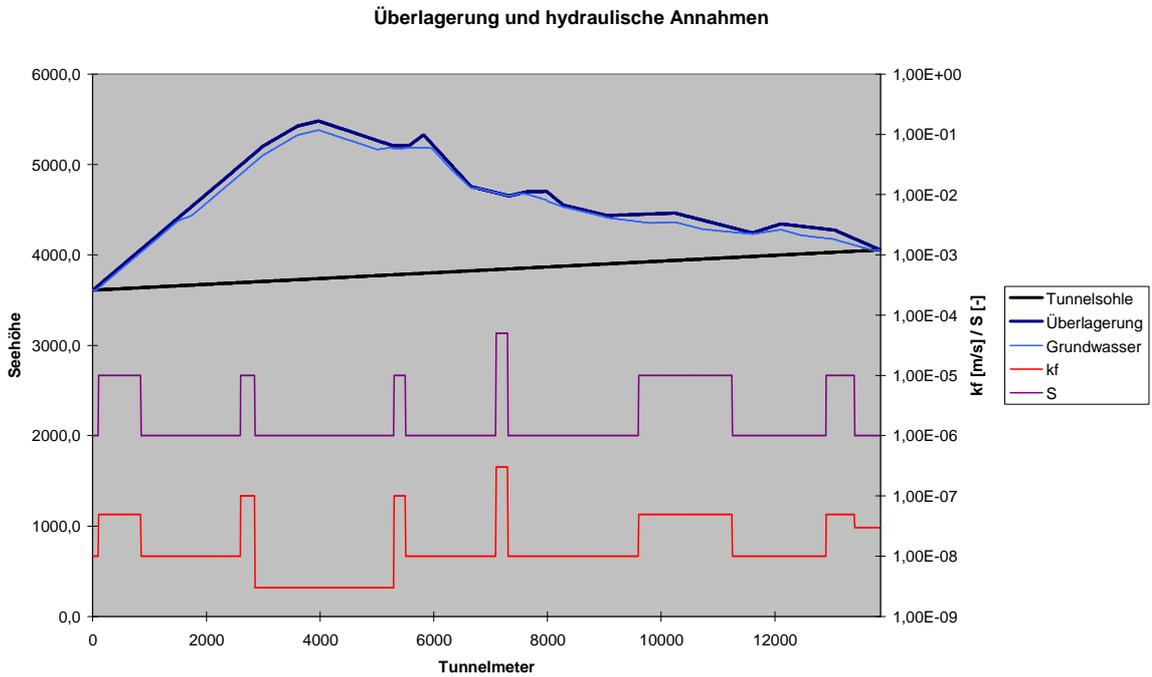


Abbildung 25. Graphische Darstellung der vereinfachten Parameter des Agua Negra Tunnels, die Basis für die weiteren Berechnungen sind.

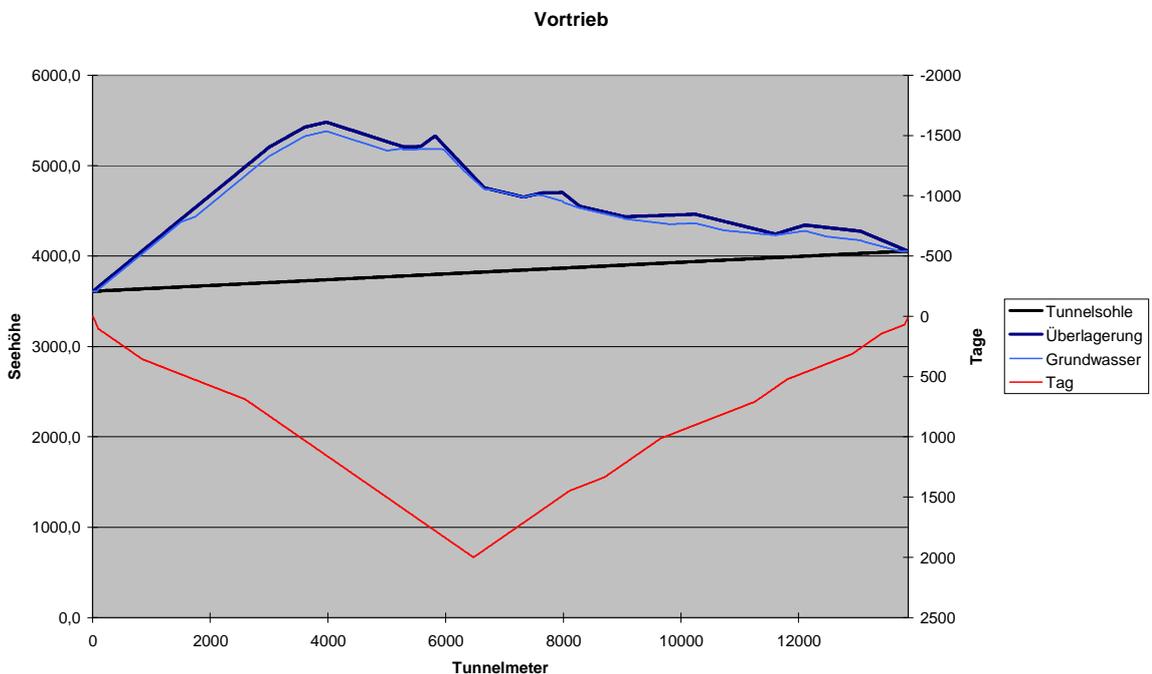


Abbildung 26. Vortrieb, unter Annahme unterschiedlicher Vortriebsgeschwindigkeiten zwischen 320 und 1920 m/a in Abhängigkeit geotechnischer Voraussetzungen.

Auf Basis der Formel von JACOB & LOHMANN (1952) ist es möglich, für den Agua Negra Tunnel den instationären Wasserzutritt für jeden Tag der Bauphase zu prognostizieren.

Dafür ist eine Annahme des Baugeschehens und der Vortriebsgeschwindigkeit notwendig. Zwecks Vereinfachung wird nur eine Tunnelröhre angenommen und es erfolgt ein Sprengvortrieb von beiden Seiten mit etwa gleichen Vortriebsgeschwindigkeiten, sodass sich die Vortriebe ungefähr in der Mitte treffen werden (siehe Abbildung 26).

Für die Anwendung der JACOB & LOHMANN-Formel ist der Abstand des Grundwasserspiegels zum Tunnel relevant. Die vereinfachten Annahmen sind in Anhang 6 zusammengefasst, sowie in Abbildung 25 bzw. Abbildung 26 dargestellt.

Als Ergebnis erhält man für jeden 10 m Tunnelabschnitt und jeden Vortriebstag einen Abflusswert. Die Ergebnisse beantworten nachfolgende Fragestellungen:

1. Maximaler Gesamtzutritt während der Vortriebszeit?
2. Maximaler Zutritt auf 10 m in l/s?
3. Maximaler langfristiger Zutritt?

Der maximale Gesamtzutritt während der Vortriebszeit ist in Abbildung 27 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass nach den og. Annahmen in Spitzenzeiten – etwa ein Jahr vor Vortriebsende – bis zu 225 l/s im gesamten Tunnel zutreten.

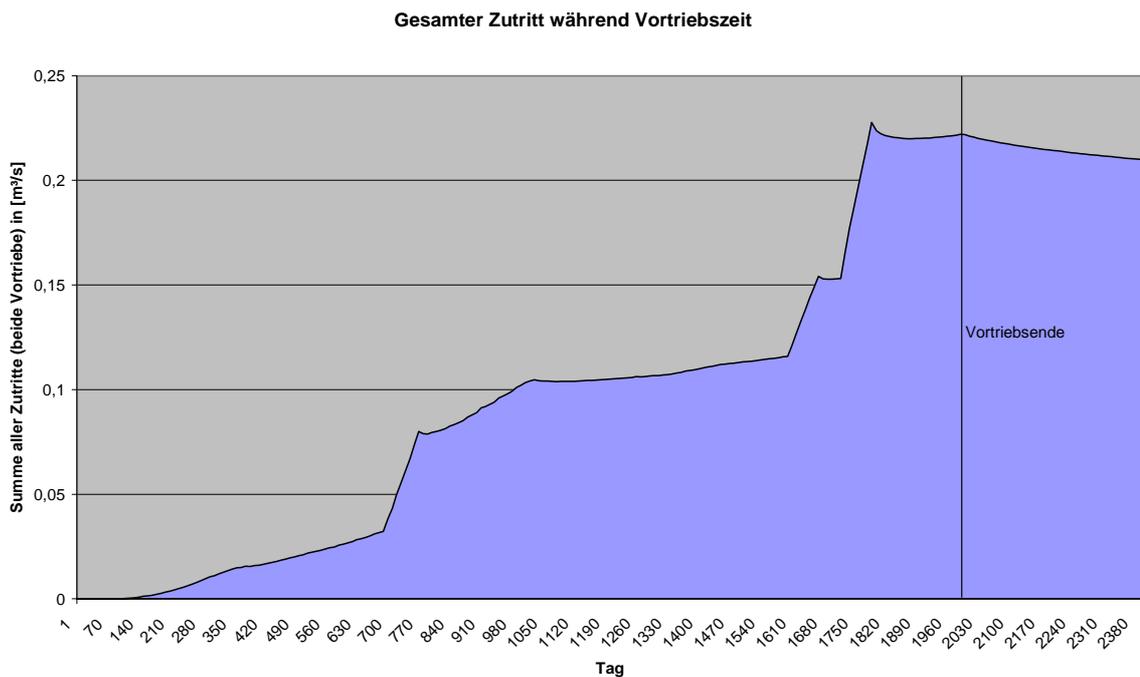


Abbildung 27. Wasserzutritt während Vortrieb, unter Annahme unterschiedlicher Vortriebsgeschwindigkeiten zwischen 320 und 1920 m/a in Abhängigkeit geotechnischer Gegebenheiten.

Der maximale Zufluss auf 10 m Vortriebslänge liegt gemäß diesen Annahmen im Bereich der Unterquerung der Quebrada di San Lorenzo. Sie wird am 1.790. Vortriebstag bei Station 7.090 (vom Westportal aus) erreicht und beträgt 5,63 l/s/10m. Die Gebirgsüberlagerung beträgt hier 850 m.

Im Zuge des Tunnelvortriebs (Dauer etwa 5,5 Jahre) klingen bereits während der Bauarbeiten die Wasserzutritte wieder ab. Abbildung 28 zeigt die theoretischen Mengen am

letzten Vortriebstag, bezogen auf die 10 m Abschnitte, Abbildung 27 die Gesamtmenge (letzter Vortriebstag ist hier gekennzeichnet).

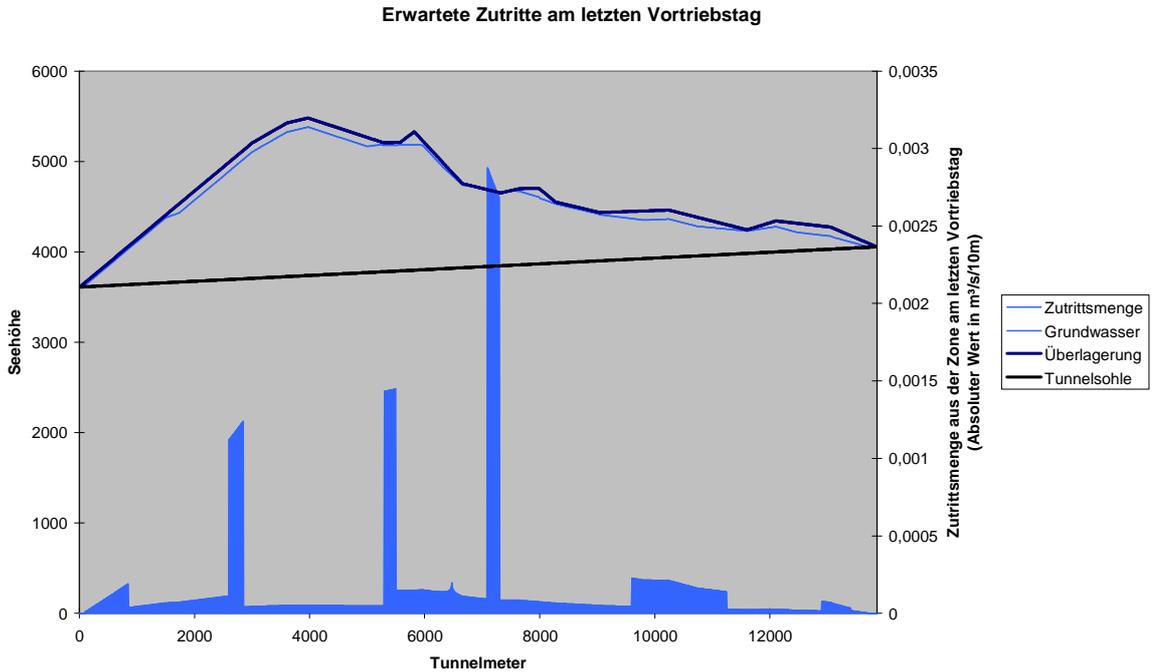


Abbildung 28. Verteilung der Zutrittsmengen in l/s/10m am letzten Vortriebstag.

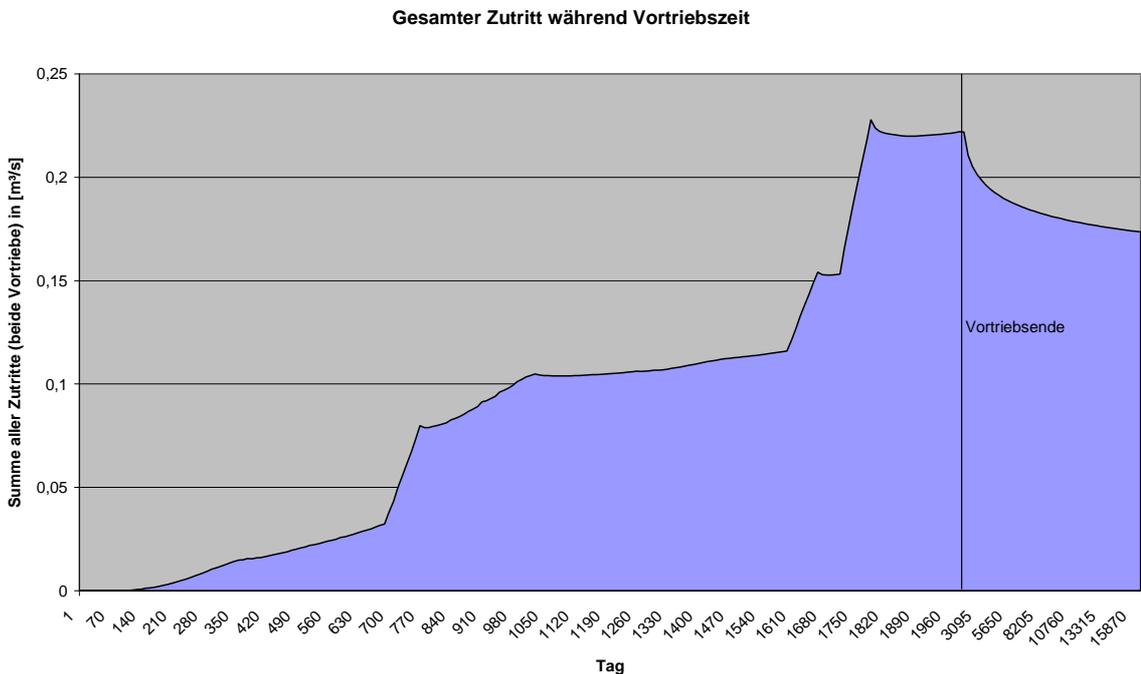


Abbildung 29. Abklingen des zutretenden Bergwassers nach Fertigstellung der Tunnelröhre. Nach Vortriebsende ändert sich im Diagramm die Skalierung von 10-Tages- auf Jahresschritte.

In Abbildung 29 ist das Abklingen der Zutritte gemäß der JACOB & LOHMANN-Formel dargestellt. Es zeigt sich, dass die Schüttung ausgesprochen langsam zurückgeht. Dabei ist zu beachten, dass nach Vortriebsende die Skalierung von 10-Tages-Schritten auf Jahresschritte wechselt.

Die zu erwartenden Temperaturen der zutretenden Wässer werden aufgrund der niedrigen Fließgeschwindigkeit der Gebirgstemperatur entsprechen.

Die Leitfähigkeit der Sickerwässer spiegelt die chemische Lösungsfracht wider. Es werden Leitfähigkeiten von bis zu 3.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ erwartet. Werden trotz der Umsicht bei der Trassierung des Bauwerks argillische hydrothermale Alterationszonen angefahren, sind gemäß den Erfahrungen im benachbarten Förderbandtunnel von Pascua Lama Leitfähigkeiten von bis zu 5.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ zu erwarten.

Chemische Eigenschaften

Aufgrund der bisherigen Ergebnisse In der Wasseranalytik sind Wässer der nachfolgenden Typen zu erwarten:

- Typ Na-Ca-Mg- HCO_3 ,
- Typ Ca-Mg-Na- SO_4 oder Mg-Ca-Na- SO_4 bis Mg-Ca- SO_4 ,
- Typ Ca-Na- SO_4 - HCO_3 -Cl,
- Typ Na-Ca- SO_4 ,
- Typ Ca-Na-Mg- SO_4 - HCO_3 und Ca-Na- SO_4 - HCO_3 .

Die festgestellte Heterogenität und Vielfalt ist dem geologischen Umfeld zuzuschreiben, im Speziellen der Art der hydrothermalischen Alteration (silikatisch, argillisch). Das Festgestein im Projektgebiet ist hydrothermal alteriert. Eine silikatische Alteration führt zu einer Verhärtung der Gesteine, zur Verheilung von Klüften und dazu, dass Wässer aus Störungen nur gering mineralisiert sind. Argillische Alteration, hingegen, führt zum Gegenteil.

Argillisch alterierte Gesteine verlieren unter Einfluss der Verwitterung an der Oberfläche weitgehend ihre Festigkeit. Bei Schneeschmelze werden sie erodiert und gehen teils in Lösung, teils in Suspension. Ein am 15.01.2008 aktiver Bach war bei keiner weiteren Begehung aktiv. Am 15.01.2008 hingegen betrug die Schüttung deutlich über 100 l/s, der pH-Wert lag bei 3,96 und die Leitfähigkeit betrug 1.041 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Der hydrochemische Befund ist in Anhang 3 unter der Bezeichnung „gelber Bach“ dargestellt.

Ein Zutritt von Wasser mit solchen Eigenschaften würde das Tunnelbauwerk stark beeinträchtigen. Extrem starke Korrosion an Stützmaßnahmen und Beton wären zu erwarten. Aus diesen Gründen wurde bei den Kartierungen und Erkundungskampagnen ein spezielles Augenmerk auf die qualitativen Eigenschaften des Grundwassers gelegt.

Bei den Bohrungen konnten so saure Milieus nicht angetroffen werden. Dennoch sind die erwarteten Bergwässer alleine aufgrund ihres Sulfatgehalts als aggressiv gegenüber Beton zu bezeichnen.

4.5 Geothermie

Das Geothermische Modell wurde in Höfer-Öllinger & Millen (2010) vorgestellt.

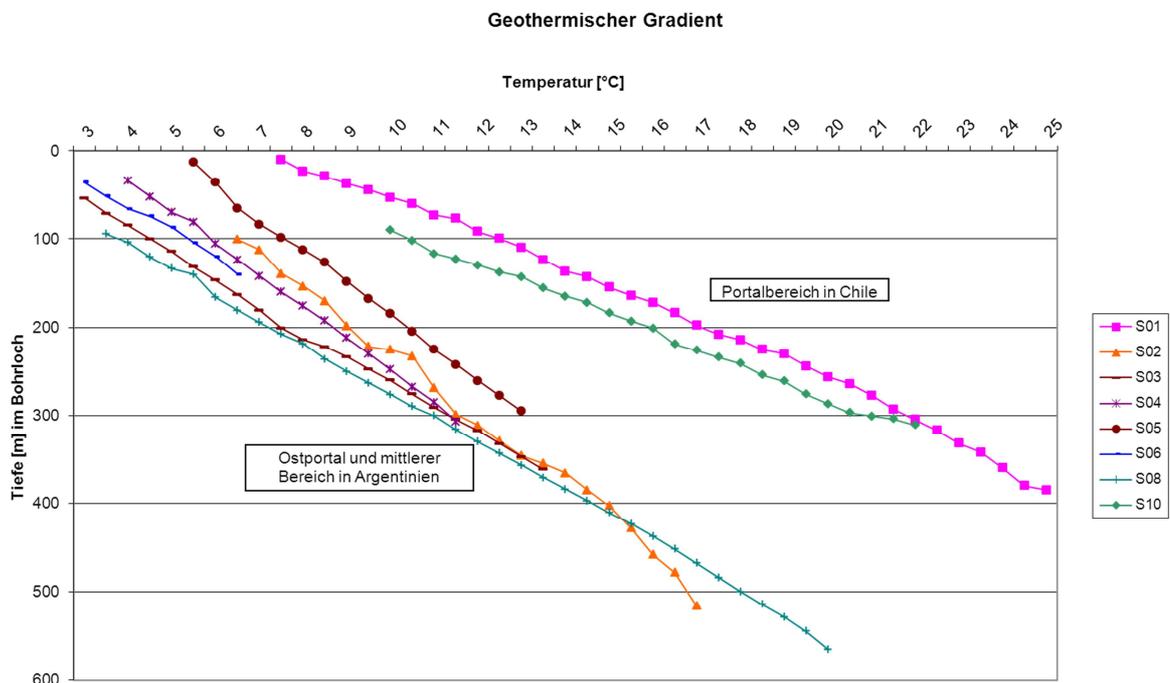


Abbildung 30. Temperaturverlauf ausgewählter Bohrungen für den Agua Negra Tunnel. Man beachte den Unterschied der Gruppe S01, S10 in Chile im Vergleich zu den anderen Bohrungen in Argentinien (HÖFER-ÖLLINGER & MILLEN, 2010).

In einem ersten Ansatz wurden die vor-Ort-Parameter von Quellen und Oberflächengewässern beurteilt. Hohe Temperaturen von Quellen konnten trotz der Höhen von deutlich über 4.000 m auf die überdurchschnittlich starke Solarstrahlung (SCHROTT, 1994) zurückgeführt werden, pH-Werte und Mineralisierung auf die Lösung von hydrothermal alterierten Zonen.

In den Bohrlöchern der Kampagnen 2009 und 2010 durchgeführte Bohrloch-Temperaturmessungen zeigten erwartungsgemäß unterschiedliche Gradienten (Abbildung 30).

Bei der Auswertung der Bohrlochmessungen stellt sich die Frage nach der Aussagekräftigkeit der Daten. Wiederholungsmessungen im Jahr 2010 zeigten, dass vom Sommer 2009 bis zum Sommer 2010 die Temperatur im gesamten Bohrlochverlauf etwa 0,5 bis 1 Grad kälter wurde. Für die weitere Betrachtung wurden die höheren, konservativen Werte herangezogen.

Extrapoliert man die angetroffenen Temperaturprofile auf die Bohrlochoberkante, zeigt die Bohrung S-08 einen negativen Wert. Dies geht nicht konform mit SCHROTT (1994), wonach generell ab 4.000 m mit Permafrost zu rechnen ist und demzufolge bei allen Bohrungen negative Werte zu erwarten wären. Die geophysikalischen Arbeiten am Agua Negra Pass wurden in den frühen 90er Jahren durchgeführt (SCHROTT, 1994). Es macht den Anschein, dass die Klimaerwärmung in zwei Jahrzehnten bereits zu einem merklichen Ansteigen der Permafrostgrenze geführt hat.

Einige der Bohrungen wurden als Schrägbohrungen ausgeführt. Der Gradient wurde für die an der jeweiligen Stelle vorliegende Überlagerung ermittelt.

Anhand von 24 ausgewählten Bohrkernproben wurden am GFZ Potsdam 170 Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit λ durchgeführt, die zu folgendem Ergebnis kamen (Werte in W/(K.m)):

- 2,2 bis 2,4: Basalt, porphyrischer Trachyt,
- 2,6 bis 2,7: Dazit,
- 2,7 bis 3,0: trachytischer Ignimbrit und Tuff, Tuff-Brekzie,
- 3,0 bis 3,5: Rhyolite (Tuff, Ignimbrit und Rhyolit),
- 3,1 bis 3,6: Andesit,
- 3,3 bis 3,7: Vulkanische Brekzie.

Anhang 7 gibt einen Überblick über die Gewichtung der Einflussfaktoren beim geothermischen Modell. Die in Anhang 8 dargestellte Spalte „interpolierte Temperatur an Geländeoberkante“ gibt die auf die Geländeoberkante interpolierte Gerade der in Abbildung 30 dargestellten Temperaturverläufe wieder. „Gradient korrigiert“ ist der geothermische Gradient unter Berücksichtigung von Schrägbohrungen und Gelände.

Es zeigt sich ein Unterschied zwischen den nach Westen exponierten Bohrungen (Chilensisches Portal, sowie Bohrung S05) und dem Rest. Die Bohrungen im Portalbereich von Chile, S01 und S10, unterliegen einem positiven Geometrieeffekt gemäß JABOYEDOFF (1999), S04 und S05 einem negativen. Bei den Bohrungen in Chile wurde zudem eine Korrektur der thermischen Leitfähigkeit für die starke Zerlegung des Gebirges in der Höhe von -10% durchgeführt (Gestein >> Gebirge).

S02 zeigt neben starken Schwankungen messtechnischer Natur (es konnte nur in Teilabschnitten gemessen werden), trotz der Positionierung in Tallage negative Abweichungen, die hier auf hydrogeologische Prozesse entlang eines Störungssystems zurückgeführt werden: Es wird vermutet, dass in diesem Bereich relativ kaltes Grundwasser aus dem Porengrundwasserleiter in das Störungssystem eindringt und entlang der Störung nach Südosten abfließt.

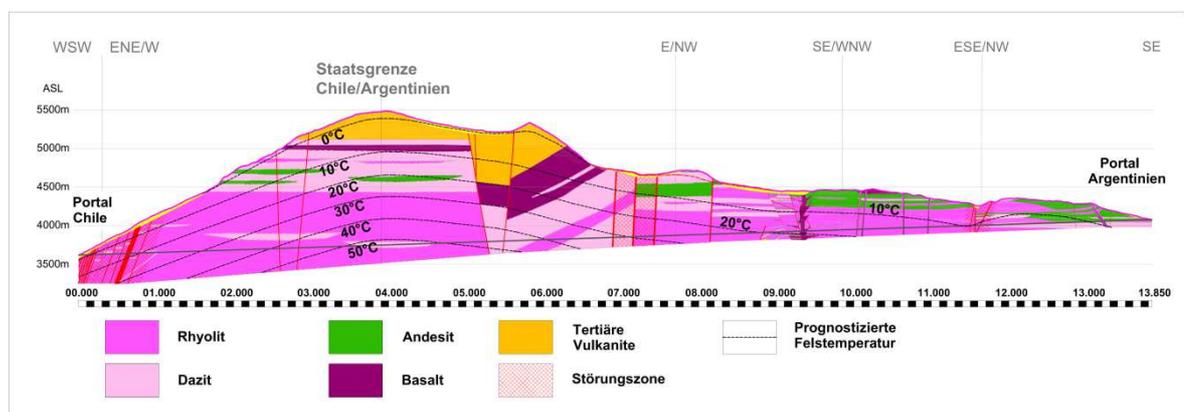


Abbildung 31. Temperaturprognose für den Agua Negra Tunnel (verändert aus: HÖFER & MILLEN, 2010). ASL = Seehöhe.

Regional betrachtet wird von einem durchschnittlichen Wärmefluss um etwa 100 mW/m^2 ausgegangen (Abbildung 04). Da der Großteil der Bohrungen unterhalb der Permafrostgrenze liegt, ist dessen Einfluss sehr schwer abzuschätzen. In Abbildung 31 wird der Einfluss in Höhen um 5000 m und darüber berücksichtigt. In diesen Bereichen ist auch der negative Geometrieeffekt am stärksten. Im zentralen Tunnelbereich wird von Temperaturen knapp über 50°C ausgegangen. Über 3 km Vortrieblänge sind Temperaturen von mehr als 40°C zu erwarten (Abbildung 31).

4.6 Trassenwahl des Tunnels

Bereits 2003 bis 2004 wurden von den Firmen Ingendesa und Consulbaires verschiedene Trassenvarianten erwogen (Abbildung 32, CONSULBAIRES & INGENDESA, 2004). Die vorliegende Bearbeitung legte in den Jahren 2008 bis 2010 in einem ersten Schritt einen Korridor und in einem zweiten Schritt eine favorisierte Variante fest.

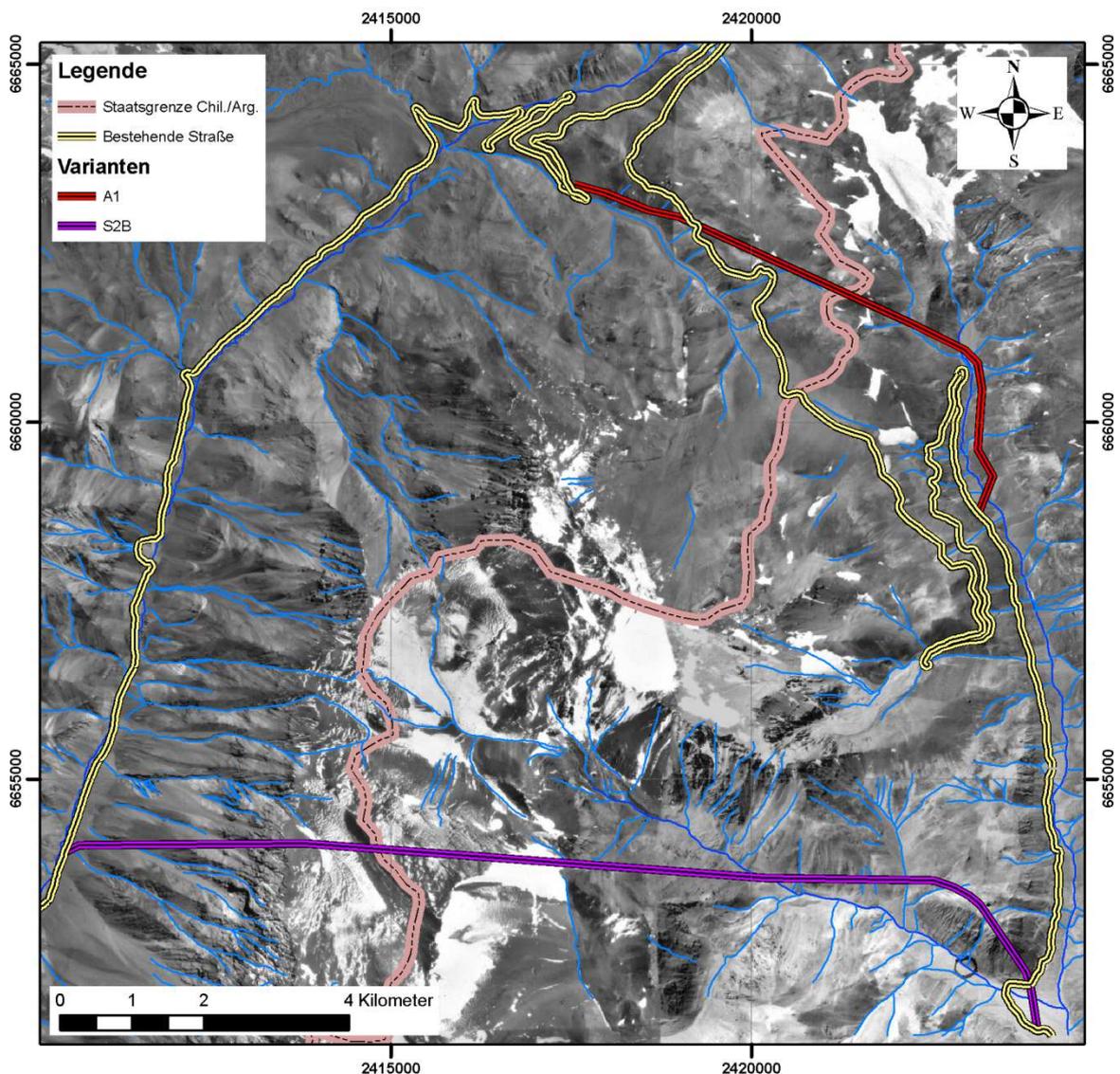


Abbildung 32. Die zwei finalen Varianten „A1“ (rot) und „S2B“ (grün) aus der Studie CONSULBAIRES & INGENDESA, (2004), die bei Beginn der gegenständlichen Bearbeitung zugrunde lagen.

Aus geologisch-hydrogeologischer Sicht werden hier Massenbewegungen, hydrothermale Alterationszonen, Störungssysteme, geogene Naturgefahren (Steinschlag, Murstriche, Lawinen, Hochwässer) und Mächtigkeit der Überlagerung berücksichtigt. Andere Aspekte wie Wintersicherheit der Zufahrten, Akzeptanz bei der Zielgruppe (Schwerer Transitverkehr) und der Gradienten in Längsrichtung werden dabei mitbetrachtet.

Massenbewegungen

Bei der Trassierung wurden mögliche Massenbewegungen berücksichtigt, da

- die Positionierung eines Portales in eine durch Hangrutschung gefährdete Zone eine unverantwortliche und unnötige Verteuerung des geplanten Bauwerks bedeuten würde,
- eine Trassierung in tieferreichenden Massenbewegungen zu großen Problemen bei Tunnelvortrieb und -erhaltung mit sich bringen würden.

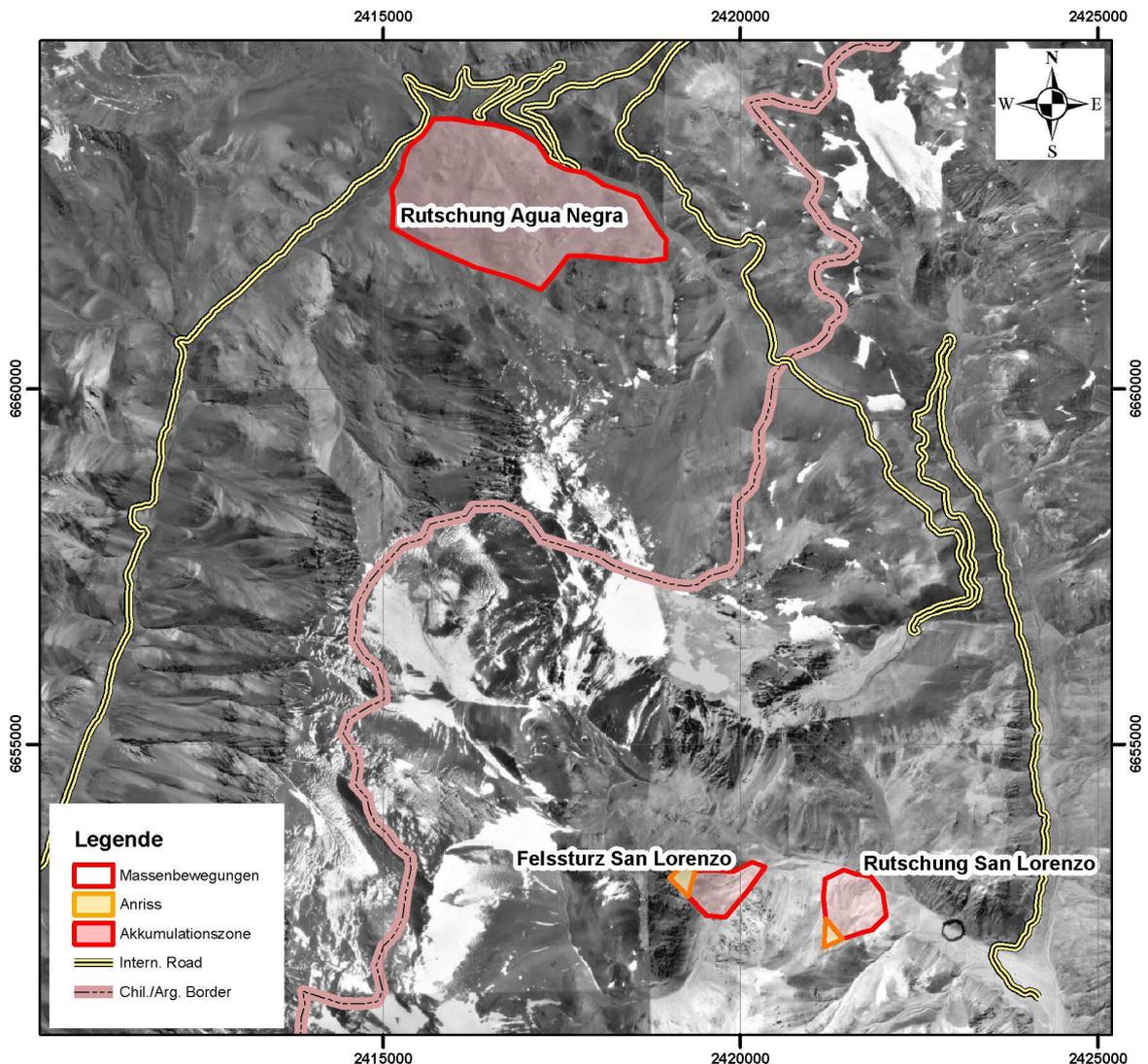


Abbildung 33. Lage der beschriebenen Massenbewegungen.

Im Bereich des Westportals der Alternative „A1“ (Abbildung 32) liegt die in Abbildung 09 dargestellte Massenbewegung westlich des Agua Negra Passes.

Der „Felssturz San Lorenzo“ liegt genauso wie die „Rutschung San Lorenzo“ an der südlichen Talflanke des San Lorenzo Tales.

Darüber hinaus wurde erwogen, ob muschelförmige Anbrüche (Abbildung 34) nördlich des Taleingangs der San Lorenzo Schlucht womöglich zu einer tiefgreifenden Massenbewegung gehören. Die Bohrungen S-05 und S-06 zeigen, dass die Anbrüche zu einem oberflächennahen System von Rutschungen gehören.



Abbildung 34. Muschelförmige Anbrüche oberhalb des Ostportals können auf tiefreichende Sackungen oder auch auf oberflächennahe Rutschungen hinweisen – hier dürfte es sich um Rutschungen handeln.

Hydrothermale Alterationszonen

Für die Trassenwahl sind die argillischen Alterationen von Bedeutung. Durch den tertiären Vulkanismus ist das gesamte Gebirge der triassischen Gesteine hydrothermal verändert.

Die argillische Alteration ist durch die auffällige Farbgebung gut im Gelände sowie im Satelliten- und Luftbild erkennbar, und man erhält rasch eine entsprechende Übersicht (Abbildung 35).

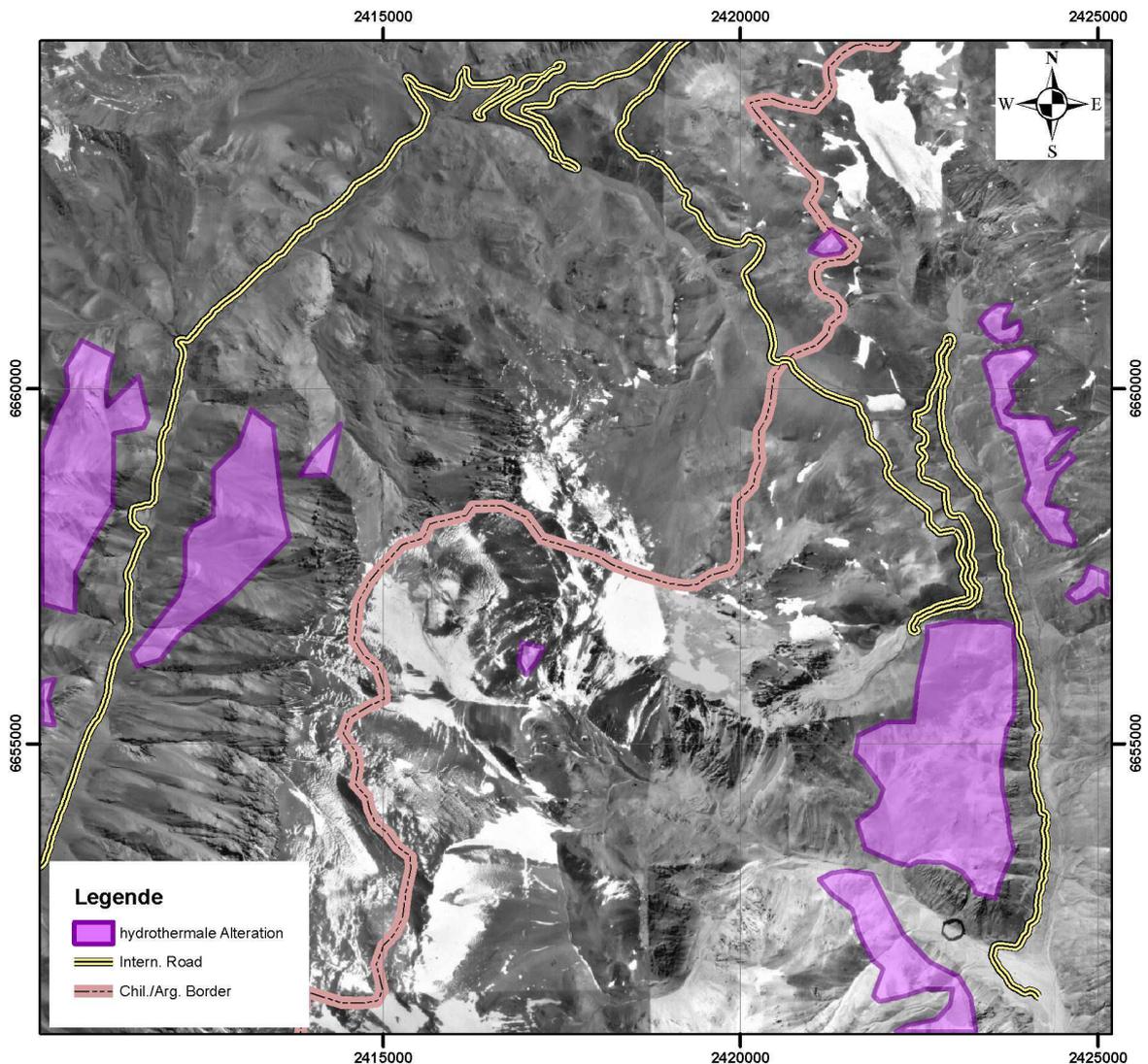


Abbildung 35. Bereiche mit vorwiegend argillischer hydrothermaler Alteration.

Diejenigen hydrothermalen Alterationszonen, die im Gelände bereits durch die auffällige Farbgebung erkennbar sind, sind wo möglich zu meiden:

- Wässer, die diese Art von Alterationszonen durchfließen, haben sehr niedrige pH-Werte (2 bis 4) und hohe Gehalte an Schwefel. Dies macht sie aggressiv gegenüber Stützmaßnahmen und Beton.
- Die betroffenen Gesteine sind meist völlig entfestigt, was insbesondere bei höheren Überlagerungen den Tunnelbau erschwert.

Bei der Trassierung werden deshalb die drei größten Bereiche mit Alterationen, nämlich beiderseits des Eingangs des San Lorenzo Tales und an der Ostflanke des Río Colorado Tales, gemieden.

Störungen

Die wichtigsten Störungsrichtungen wurden in 4.2 besprochen. In Abbildung 36 sind die wesentlichen Strukturen des bereits eingegrenzten Untersuchungsgebietes dargestellt.

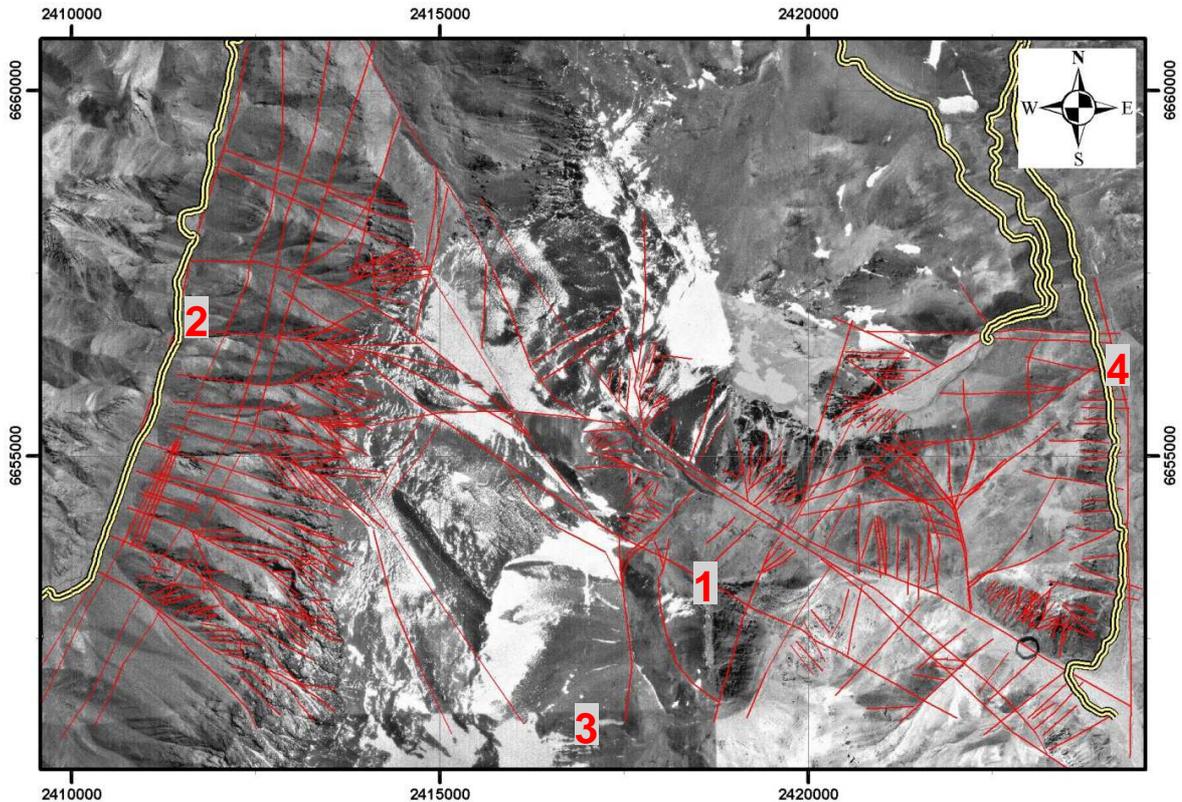


Abbildung 36. Strukturen des Untersuchungsgebietes (rote Lineamente), Legende wie Abbildung 35. 1 = San Lorenzo System, 2 = Río Colorado System, 3 = Olivares Störung, 4 = Agua Negra Störung.

Die nachfolgenden Strukturen werden bei der Planung des Agua Negra Tunnels besonders berücksichtigt:

- Quebrada di San Lorenzo Störung. Diese WNW-ESE verlaufende Störung muss – je nach Trassenlage – unterquert werden. Sie wurde mit der Bohrung S-02 erkundet und soll mit der Bohrung S-09 noch genauer erkundet werden.
- Río Colorado Störung. Diese N-S verlaufende Störung betrifft das Westportal des Tunnels. Für die Erkundung dieser Störung dienten die Bohrungen S-01a und S-10.
- Olivares Störung. Diese Struktur wird jedenfalls mit dem Tunnel gequert und soll mit der Bohrung S-09 noch genauer erkundet werden.

Bei der Trassierung werden Störungen entweder gemieden, oder möglichst orthogonal gequert.

Mächtigkeit der Überlagerung

Mit zunehmender Überlagerung steigen Gebirgsdruck, Wasserdruck und Temperatur. Die von CONSULBAIRES & INGENDESA, (2004) vorgeschlagene Trasse „S2B“ (Abbildung 32) hat im Bereich der Staatsgrenze eine Überlagerung von 2.000 m. Unter Berücksichtigung aller anderen genannten Determinanten werden bei der Trassierung allzu hohe Überlagerungen ausgeschlossen.

Definition von Korridor und Trasse

Die geometrischen Vorgaben sind durch die Geomorphologie und eine maximale Längsneigung des Bauwerkes vorgegeben. Die Geomorphologie ist bei nahezu allen Andenbasistunnel-Varianten durch eine Asymmetrie gekennzeichnet, die dazu führt, dass das chilenische Portal tiefer liegt als das argentinische. Der Talboden auf der chilenischen Seite liegt auf 3.550 bis 3.650, auf der argentinischen Seite zwischen 4.065 und 4.200 m über dem Meeresspiegel. Die maximale Längsneigung ist mit 3,5 % vorgegeben.

Die Trasse wurde nach der Evaluierung aller Randbedingungen wie folgt festgelegt:

- Nachdem die Entscheidung für die Variante des Basistunnels getroffen war, erfolgte die Überlegung, wo im Bereich des San Lorenzo Tales die Trassierung zu erfolgen hat. Die bestehende Alternative „S2B“ zeichnete hierfür bereits einen ersten Vorschlag.
- Die Grundsatzentscheidung, ob man die südliche oder nördliche Talflanke des San Lorenzo Tals durchörtert, wurde auf Basis zweier Überlegungen getroffen:
 - In der südlichen Talflanke gibt es zwei größere Massenbewegungen (Abbildung 33), die an einem WNW-ESE streichenden Störungsbündel angelegt sind. Diese Störungen dürften tektonisch aktiv sein.
 - Jedenfalls ist die südliche Flanke schwer zu kartieren, Festgesteinsaufschlüsse liegen bedeckt unter den Rutsch- und Sturzmassen. Erkundungsbohrungen wären schlecht planbar, kostspielig und riskant.

Aus diesen Gründen wurde die Idee der Alternative „S2B“ beibehalten, zunächst in der Nordflanke zu bleiben.

- Im Eingangsbereich des San Lorenzo Tales gibt es beiderseits Zonen, die mächtige hydrothermale Alterationen aufzeigen. Bleibt man mit der Trasse – von Argentinien aus gesehen – die ersten 2,5 Strecken-Kilometer in Lehnenlage des linken Talrands, so verläuft sie in einem schmalen Streifen Festgesteins, das nicht durch argillische Alteration entfestigt ist.
- In etwa zur Hälfte der Trassierung stellt sich die Frage nach dem besten Punkt für die Querung des San Lorenzo Tales. Die Bohrung S-02 erkundete die Hauptstörung des Tales auf der Höhe des Felssturzes und zeigte mehrere Zehnermeter mächtige Zonen mit starker Zerlegung. Bei den Oberflächenkartierungen und im Satellitenbild wurde festgestellt, dass die San Lorenzo Störung im Nordwesten, im „Amphitheater“ am Ende des Tales, auf mehrere, deutlich kleinere Teilstörungen auffächert. Aus diesem Grund erfolgte der Vorschlag, das San Lorenzo Tal so weit westlich und so orthogonal wie möglich zu queren.

- Eine technisch schwierige Situation liegt beim Westportal. Das aus trassierungstechnischer Sicht beste Portal („Engineer’s Portal“) befindet sich 0,9 km nördlich des aus geologischer Sicht besten Standortes. Letzterer („Geologist’s Portal“) befindet sich am einzigen Felsaufschluss am Hangfuß des hier 2,5 km hohen Olivares Westhanges.

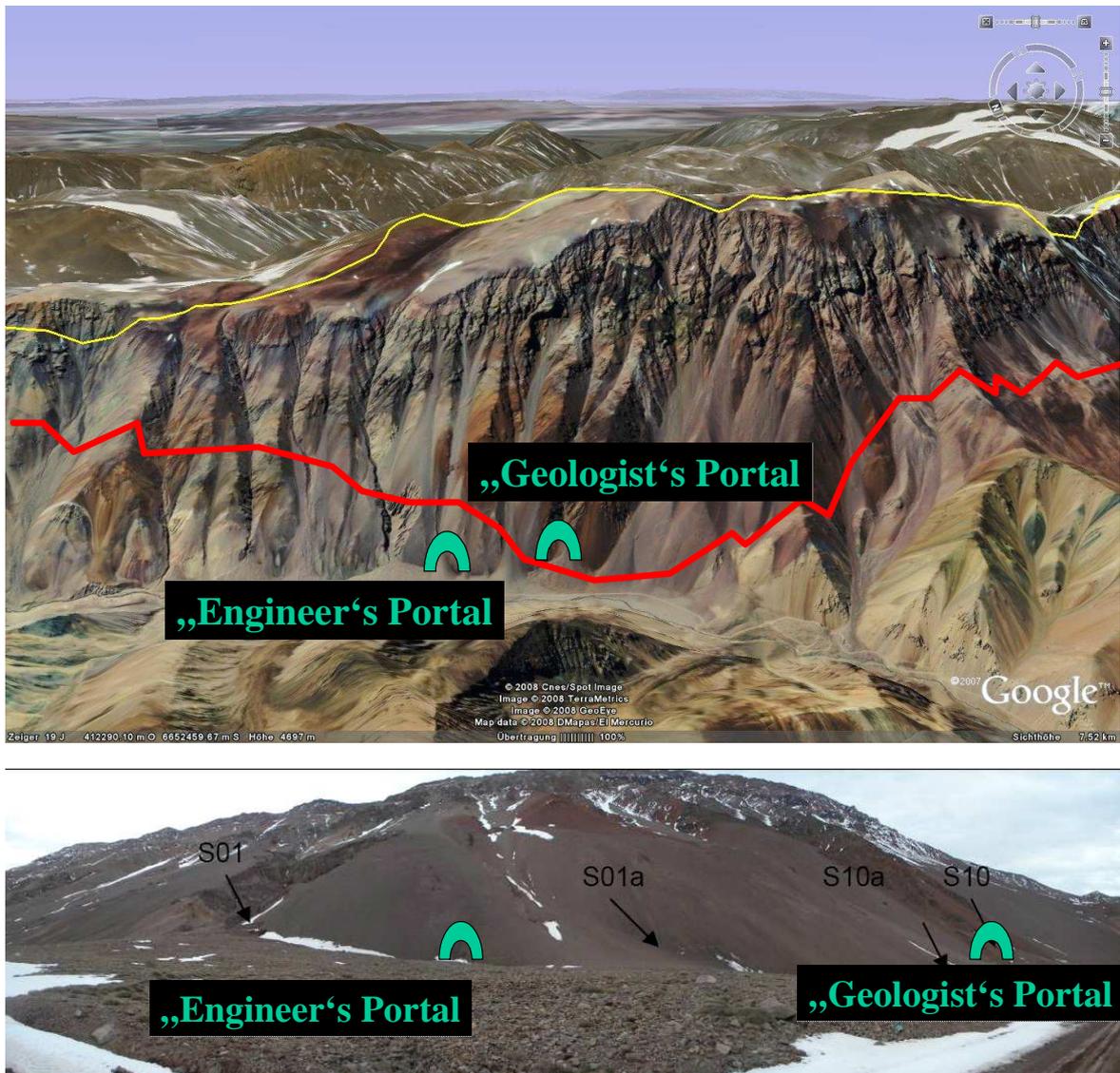


Abbildung 37. Perspektivische Ansicht mittels „Google Earth“, Blickrichtung Ost in Richtung Argentinien (oben) und Bodenansicht. Die rote Linie zeigt vereinfacht die Ostgrenze der Río Colorado Störung an der Westflanke des Cerro Olivares, die gelbe die internationale Grenze.

Um die Situation vor Ort für die Festlegung des Portals entscheiden zu können, wurden die Bohrungen S-01a (bei „Engineer’s Portal“, Nordvariante, in Abbildung 37) und S-10 (bei „Geologist’s Portal“, Südvariante) abgeteuft.

Die Bohrung S-01a bei der Nordvariante zeigte nach 32 m Quartärüberlagerung wie erwartet 80 m Störungszone bzw. stark zerlegtes Material.

Dem gegenüber zeigte die Bohrung S-10 bei der Südvariante vom ersten Meter an Festgestein, ebenfalls wie erwartet. Allerdings zeigte sich – entgegen den Erwartungen – auch

das Gestein der S-10 stark zerlegt. Es dürfte sich um die Zerlegungszone im Randbereich der Río Colorado Störung handeln.

Die Festlegung der Südvariante hätte trassierungstechnisch zu einer ungünstigen Situation in der Zufahrt bewirkt. Darüber hinaus wäre der Tunnel durch diese Maßnahme um gut 750 m länger geworden. Aus diesen Gründen und – vor allem – aufgrund der Tatsache, dass auch der „gesunde Fels“ der Südvariante nicht so ungestört wie vermutet war, wurde für die Festlegung des Westportals die nördliche Variante gewählt.

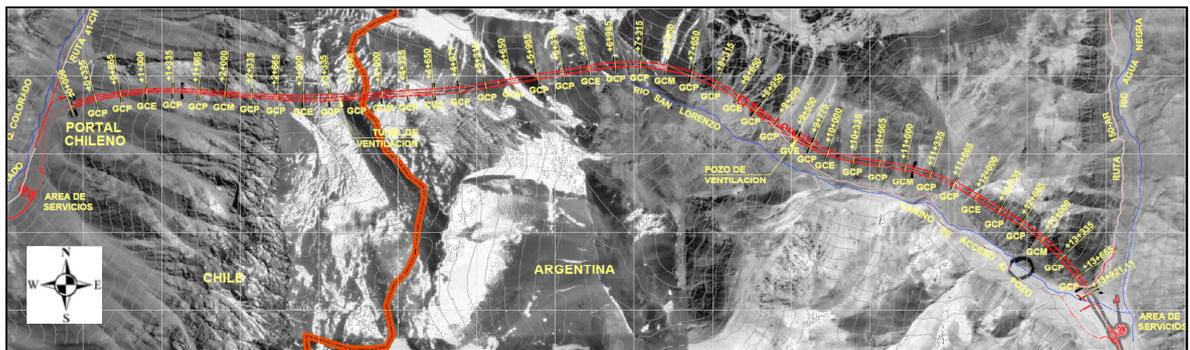


Abbildung 38. Finale Trasse, wie sie für die weitere Bearbeitung verfolgt wurde, aus: BÖFER & HÖFER-ÖLLINGER, 2012.

5 BASISTUNNEL DES CORREDOR BIOCEÁNICO ACONCAGUA

5.1 Vorhaben

Der Tunnel soll als zweiröhriger Eisenbahntunnel in mehreren Bau- und Betriebsphasen ausgeführt werden. In einer ersten Betriebsphase werden Tunnel und Strecken mit nur eingleisig mit Ausweichstrecken in regelmäßigen Abständen ausgeführt. Mit zunehmender Auslastung werden erst auf den Zulaufstrecken des Tunnels ein zweites Gleis und in weiterer Folge die zweite Tunnelröhre errichtet.

Tabelle 04 Die wesentlichen Eckdaten des CBA Basistunnels.

Technische Daten des Basistunnels des Corredor Bioceánico Aconcagua	
Länge	52,4 km (in Alternative 5)
Längsneigung	1,5 %
Entwurfsgeschwindigkeit	120 km/h
Minimale horizontale Radien	300 m (bei 60 km/h)
Abstand zwischen den zwei Röhren	60 m
Höhendifferenz zwischen den Portalen	780 m
Höhe des chilenischen Portals	1.620 m
Höhe des argentinischen Portals	2.400 m
Maximale Überlagerung	2.250 m
Ausbruchsdurchmesser	9,5 m (TBM), 9,0 m (NATM)

5.2 Geologisches Modell

Die Formationen kamen im Zuge von Orogenesen in ihre heutige Lage. Dabei entstand ein Deckenstapel, der sich mehrfach wiederholt. Das regionale Lineament- und Störungsmuster streicht N-S mit generellem Einfallen Richtung Westen. Auf Basis dieses struktureologischen Modells ergibt sich, dass generell die älteren Formationen (Formation Alto Tupungato) im Osten auftreten und die jüngeren Formationen (Formation Juncal) im Westen vorherrschen. Eine Auflistung der im Projektgebiet vorkommenden Formationen und zugehörigen Gesteinsarten findet sich im Anhang 9.

In struktureologischer Hinsicht wird das Projektgebiet durch das Auftreten von nach Westen geneigten Gesteinsschichten geprägt. Der Einfallswinkel nimmt progressiv von Ost nach West zu. Die Werte schwanken, ausgehend von ca. 10° bei Puente del Inca, bis ca. 90° im zentralen Bereich (Quebrada Navarro) und einer anschließenden erneuten Reduktion des Einfallswinkels bis auf ca. 30° im äußersten Westen (Abbildung 39 und Abbildung 40, sowie Abbildung 41 ff.).

Die wesentlichen tektonischen Strukturen sind von Westen kommende Überschiebungen, die eine Art Akkretionskeil bilden. Dieser Akkretionskeil besteht aus jurassischen und kretazischen marinen Sedimenten und Vulkaniten. Die basale Hauptüberschiebung entspricht der Störung Penitentes im Osten („MAO“ in Abbildung 39; Abbildung 40, Abbildung 41). Bis zu den tertiären Vulkaniten im Westen liegen auf eine Länge von etwa 12 km Gesteine vor, die ursprünglich in einem etwa 40 km breiten Becken abgelagert wurden. Die starke Verkürzung verursacht neben einer Art Deckentektonik mit zahlreichen Überschiebungen auch intensive Faltung. Die Abfolge wird als „Aconcagua Thrust Fold Belt“ (RAMOS et al. 1996, 2004, Abbildung 40) bezeichnet. In diesem Bereich erreicht das Gebirge große durchschnittliche Höhen und mit dem Aconcagua die höchste Erhebung Südamerikas.

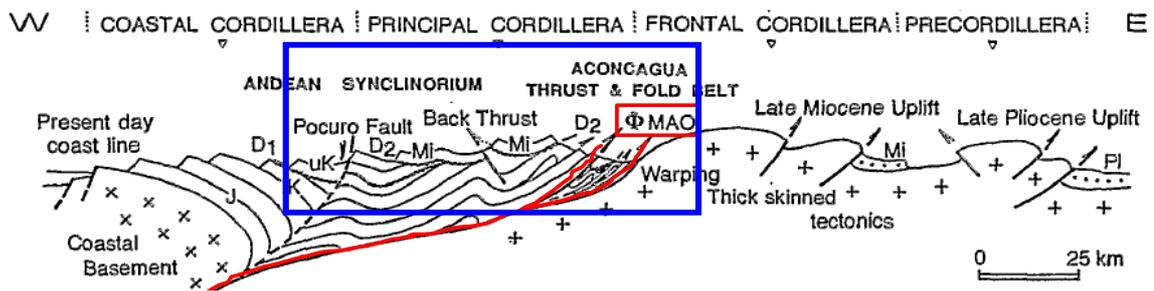


Abbildung 39. Interpretative Rekonstruktion der Anden bei 32°40' S (Aconcagua), vertikal überhöht. MAO = Main Andean Overthrust (aus: VICENTE, 1993). Der blaue Rahmen zeigt das Detail in Abbildung 40.

STRUCTURAL CROSS SECTION (33°S)

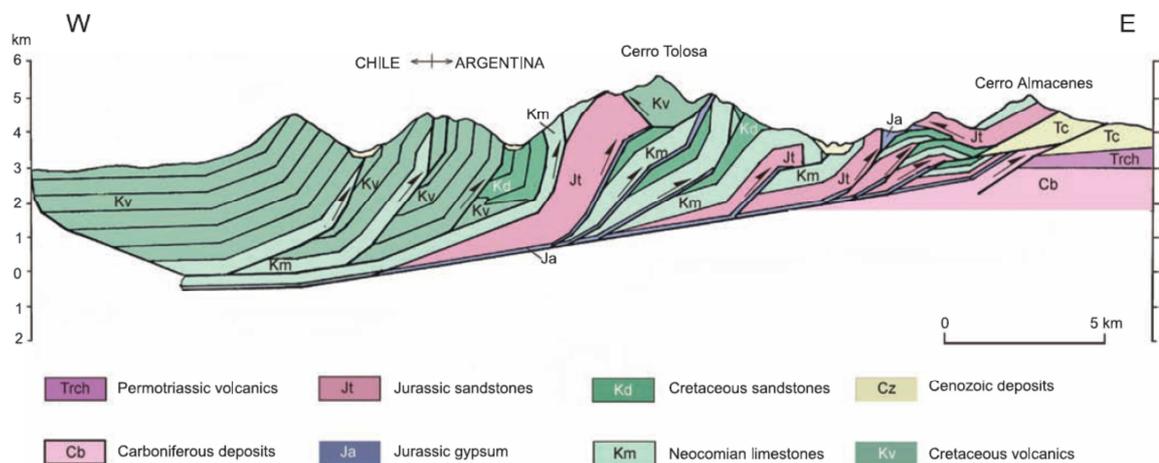


Abbildung 40. Der thin-skinned Aconcagua Thrust Fold Belt (ATFB), aus: RAMOS et al. (1996, 2004). Die Formation Alto Tupungato wird dem Karbon zugeordnet, die permotriassischen Vulkanite entsprechen der Formation Choyoi, der jurassische Gips der Formation Auquilco, die jurassischen Sandsteine der Formation Tordillo, die Kalke des Neokomiums der Mendoza Gruppe, die kretazischen Sandsteine den Formationen Cristo Redentor und Diamante, die kretazischen Vulkanite der Formation Juncal und die känozoischen Ablagerungen der Formation Agua de la Piedra.

Neben den Störungen mit der Hauptorientierung N-S gibt es ein W-E orientiertes Störungssystem. Dieses System wird erstlinig vom Lineament des Tales des Río de Las Cu-

evas, zwischen dem gleichnamigen Ort im Westen und dem Zusammenfluss des Flusses mit dem Río Tupungato im Osten repräsentiert. Auch Teil des Tales des Río Juncal in Chile liegen an dieser Struktur.

Die in Abbildung 40 als „thin-skinned Aconcagua Thrust Fold Belt“ beschriebene Einheit wird in ihrer vollen Breite vom Corredor Bioceánico Aconcagua gequert. Die nachfolgende Darstellung erfolgt von unten nach oben, bzw. von Ost nach West.

Das autochtone Basement im Osten besteht aus den Formationen Alto Tupungato, Choyoi, aus permischen Intrusionen und der untersten jurassischen Einheit, der Formation la Manga.

In dieser letztgenannten Formation hat gemäß RAMOS (1993) die – von Ost nach West gesehen – erste Überschiebung Platz genommen, die so genannte „Penitentes Störung“ (Abbildung 41). Die Gesteine, die darauf folgen, sind allochthon und wurden von West nach Ost transportiert. Gemäß RAMOS (1996) handelt es sich um einen „typischen Falteingürtel des epidermischen Typs (‘thin-skinned thrust belt’), in dem man die Existenz eines basalen Ablösungshorizontes interpretieren kann.“

Die allochthonen Gesteine existieren in den Formationen la Manga (die einmal auf das autochtone Äquivalent geschoben sind und damit verdoppelt ansteht), Auquilco, Tordillo; in der Gruppe Mendoza mit ihren Formationen Vaca Muerta, Mulichinco und Agrio; ferner in den Formationen Cristo Redentor (Diamante) und Juncal. Die jüngste Formation Agua de la Piedra ist nicht die westlichste, sondern stellt den synorogenen obermiozänen Abtragschutt der ansteigenden Anden dar. Er liegt diskordant dem Deckenstapel auf und ist teilweise mit überschoben.

Die wichtigsten Überschiebungen sind die „Störung Penitentes“, „Störung Quebrada Blanca“, „Störung La Yesera“, „Störung Las Leñas“, „Störung Quebrada Navarro“ und „Störung Las Cuevas“ (RAMOS, 1996; siehe Abbildung 41).

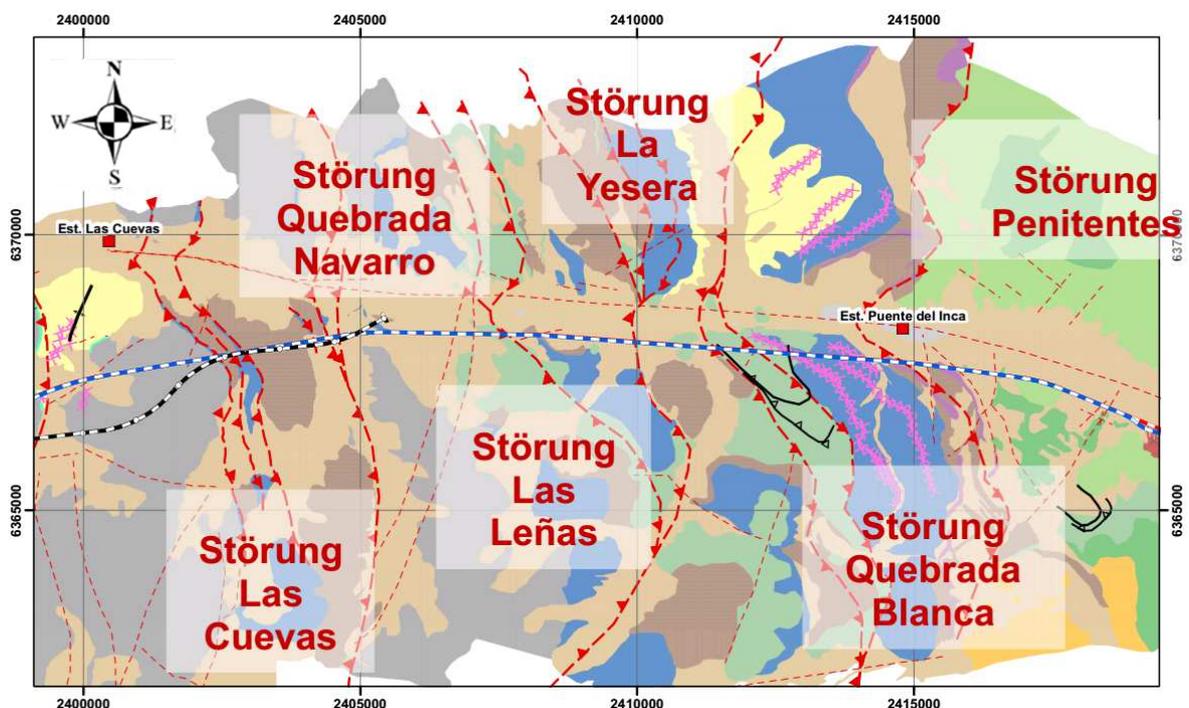


Abbildung 41. Hauptüberschiebungen im Bereich südlich des Aconcagua.

Diese Hauptüberschiebungen zeigen Störungssysteme, die häufig Gipsdiapirismus aufweisen. Sie besitzen durchwegs ein Einfallen Richtung Westen mit unterschiedlichen Einfallswinkeln. Die unterste Überschiebung (Penitentes Störung) besitzt im Bereich Puente del Inca einen Einfallswinkel von weniger als 15° . Die steilste Störung liegt in der Quebrada Navarro und steht an der Oberfläche vertikal an.

In Summe wird in diesem Bereich die jurassische Sedimentfolge von einer ursprünglichen Beckenbreite von 38 bis 40 km um ca. 25 bis 28 km auf 12 bis 15 km verkürzt.

Die duktile Deformation im Projektgebiet wird durch antiforme Faltenstrukturen der Formationen Juncal und Cristo Redentor repräsentiert. Bei der Formation Cristo Redentor handelt es sich um eine antiklinale Faltenstruktur, die in Form einer offenen Falte mit einem stärker geneigten westlichen Schenkel im Gelände ansteht (Abbildung 42). Die Faltenachse verläuft NNO-SSW. Die Struktur wurde Richtung Osten auf die Sequenzen der Formation Vaca Muerta und Formation Juncal aufgeschoben (BÖFER et al. 2008).

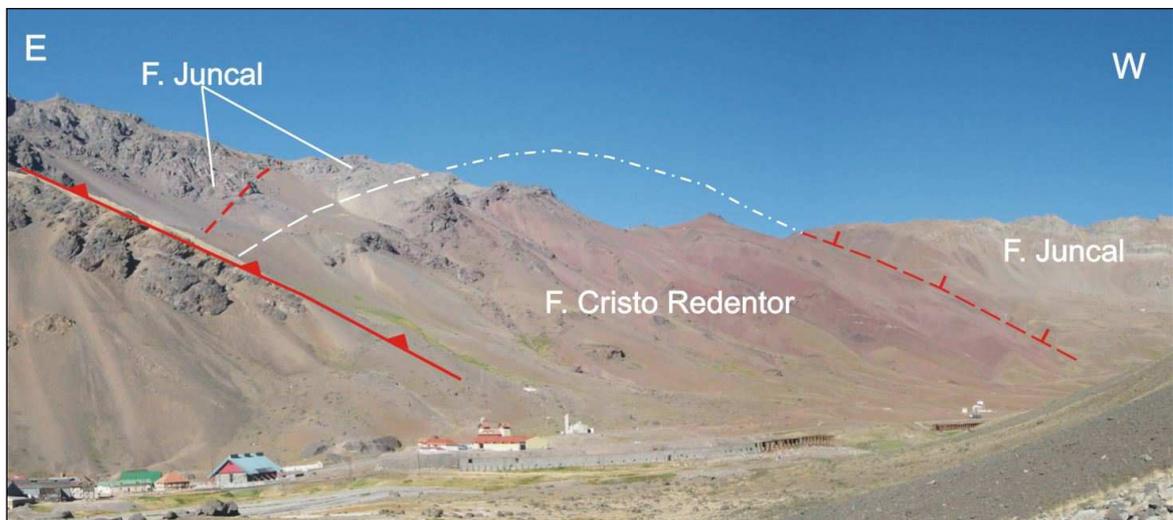


Abbildung 42. Antiklinale Cristo Redentor. In rot gehalten die tektonischen Kontakte (Überschiebung: Dreiecke; Störung: strichlierte rote Linie) die die Struktur Richtung Westen und Südosten begrenzen. Die weiss-strichlierte Linie zeichnet die ursprüngliche Form der Antiklinale nach (BÖFER et al. 2008).

Eine weitere antiforme und offene Falte, ebenfalls mit einer Achsenorientierung von NNO-SSW kann in der südlichen Talflanke am Beginn des Juncal Tales beobachtet werden. Diese Struktur entwickelte sich zur Gänze in der Formation Juncal (Abbildung 43).

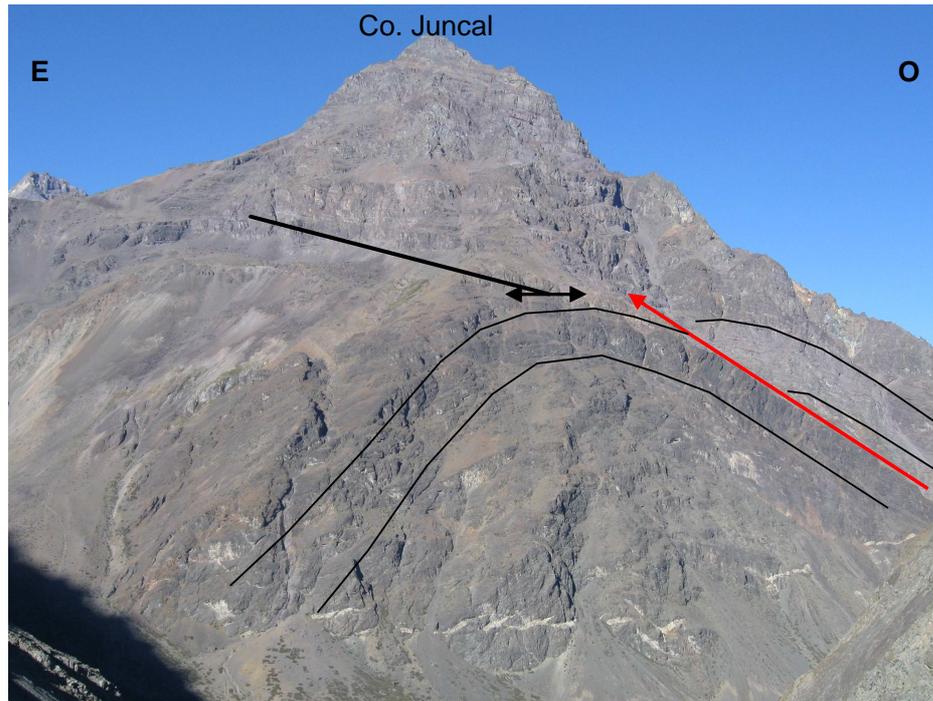
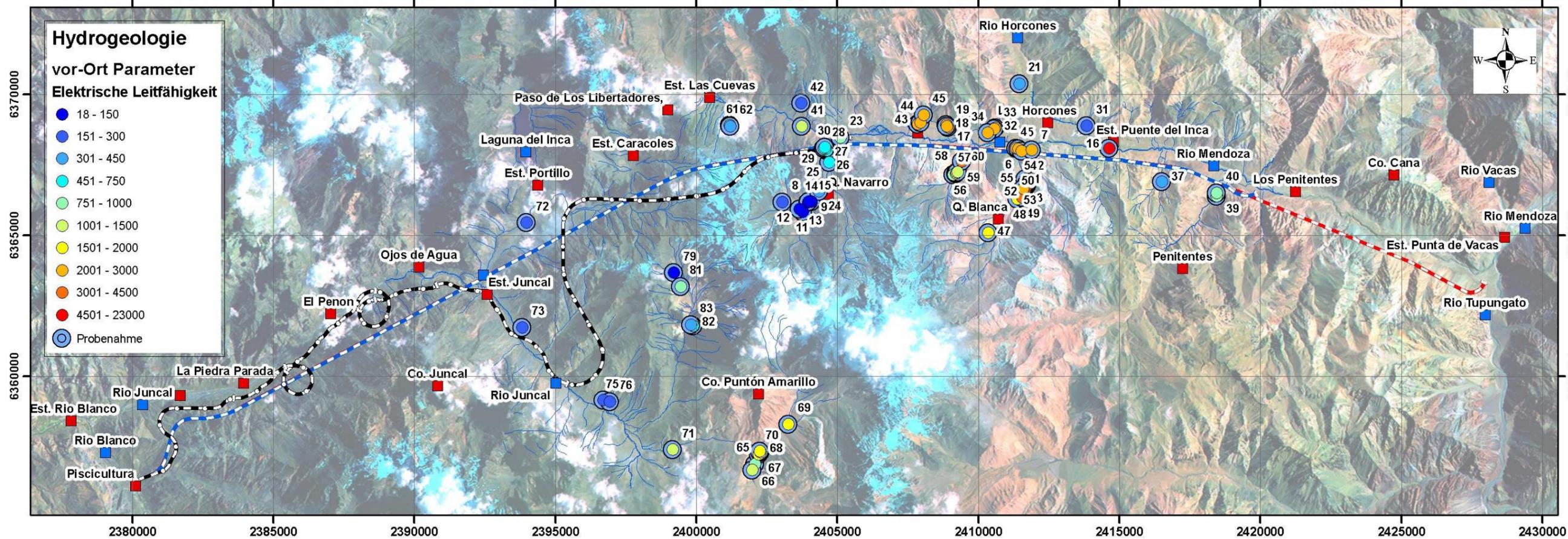
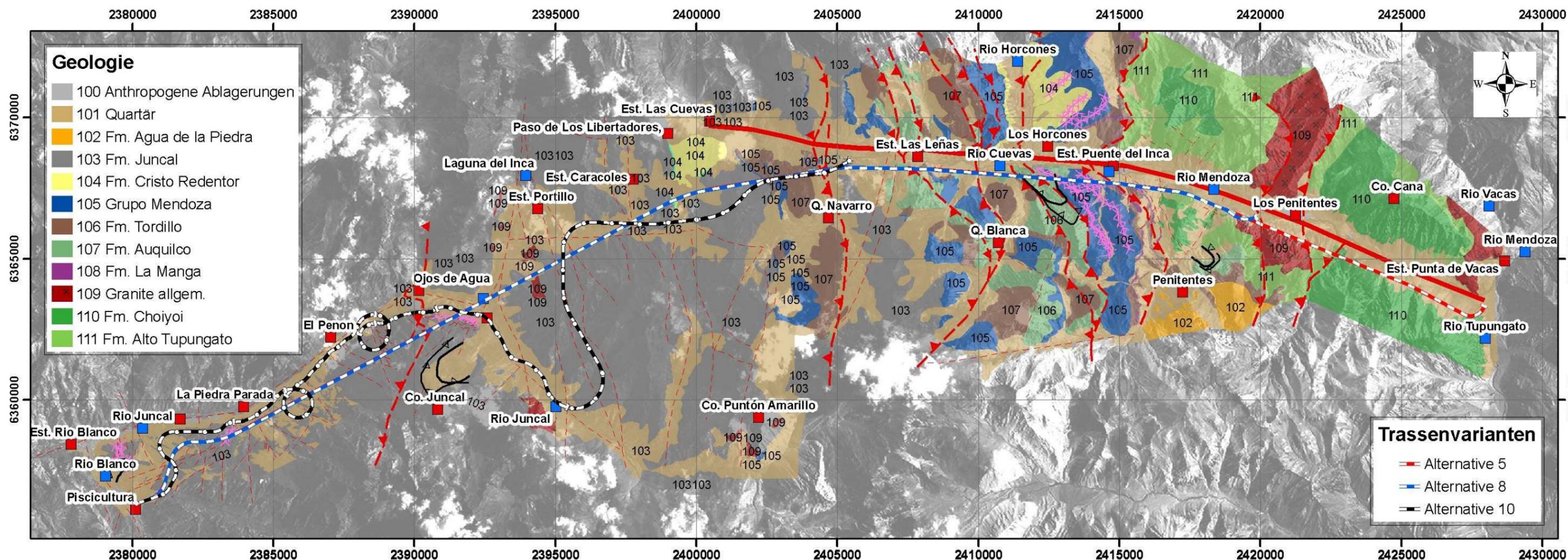


Abbildung 43. Antiklinalstruktur des Cerro Juncal, mit Überschiebung von Westen kommend.

Abbildung 44. Nächste Seite: Geologische und hydrogeologische Karte des Basistunnels, Varianten 5 (rot), 8 (blau) und 10 (schwarz), des Corredor Bioceánico Aconcagua, Maßstab 1:150.000, Stand Juli 2008, verändert aus: BÖFER et al., 2008.



Geologische Formationen

Formation Alto Tupungato – marine neopaleozoische Ablagerungen (POLANSKI 1958, RAMOS 1996). Karbon:

Die Formation Alto Tupungato ist im Osten von Puente del Inca aufgeschlossen und wird von Grauwacken dominiert. Untergeordnet treten auch grobkörnige Sandsteine auf sowie Zwischenschaltungen von Tonsteinen. Die Gesteine zeigen eine rhythmische Schichtung bzw. Schieferung. Die Mächtigkeit dieser Formation kann 3.000 m erreichen.

Permische Granitoide – Intrusivkörper innerhalb der Formation Alto Tupungato (DARWIN 1846, RAMOS 1996). Perm:

Der Hauptkörper der insgesamt drei Intrusivkörper, der Granit Cruz de Caña, ist im Norden und Süden des Río de las Cuevas und – südöstlich von Puente del Inca – in der Quebrada de Vargas aufgeschlossen. Es handelt sich um rosafarbene bis hellgraue Granite, mit hypidiomorpher granularer Struktur. Der westliche Sektor des Intrusivkörpers von Cruz de Caña ist durch Granodiorite und Tonalite dominiert.

Formation Choiyoi – Vulkanische und vulkanoklastische Sequenz (GROEBER 1946). Trias:

Diese Gruppe wurde für den Agua Negra Tunnel (Kapitel 4.2) bereits ausführlich beschrieben. Sie liegt auch hier diskordant über dem Basement und ist aus vulkanischem und vulkanoklastischem Gestein aufgebaut. Sie besitzt einen heterogenen Aufbau und ist aus Ignimbriten, Rhyolithen, Brekzien, Daziten, Tuffen und andesitischen Laven zusammengesetzt. Ihre durchschnittliche Mächtigkeit liegt hier zwischen 600 und 800 m.

Formation La Manga – in deutlicher Diskordanz lagerte sich über die vorherig gebildeten Gesteine eine Einheit von Kalken ab, (YRIGOYEN 1972 und 1993). Oxford:

Es handelt sich um Konglomerate, Sandsteine, Kalk und Kalksandstein, teils brekziös. Ihre Aufschlüsse präsentieren sich in zwei sich tektonisch wiederholenden Streifen. Der östliche und autochtone erstreckt sich vom Norden von Puente del Inca bis zum Cerro Penientes und ist an beiden Enden von Konglomeraten (Santa Maria, Formation Agua de la Piedra) bedeckt. Der zweite Streifen wird durch die Penientes Überschiebung kontrolliert und erstreckt sich nördlich von Puente del Inca.

Formation Auquilco – (WEAVER 1931, GROEBER 1946). Kimmeridge:

Diese Formation repräsentiert die mächtigen Gipsvorkommen in den mittleren Anden. Sie prägt die Hang- und Gipfelbereiche südlich des Las Cuevas Tales, die Quebrada Navarro und Río Blanco und tritt im Bereich des Cerro Penientes auch im Zusammenhang mit der gleichnamigen Störung auf. In der nördlichen Talflanke des Las Cuevas Tales steckt sie diapirartig in den Störungen. Stratigraphisch kommt sie über der Formation Chacayano („Tordillo“) und unter der Formation Tordillo (s.s.) zu liegen. Ihr Alter ist damit post-Oxfordian und prä-Thitonian, was ihr eine Entstehung im Kimmeridge zuordnet. Die Mächtigkeit ist schwer zu bestimmen, im Zuge der Gebirgsbildung unterlag sie Verdickungen und Ausdünnungen. Die meisten Störungen haben Gips eingeschuppt, was nahelegt, dass das extrem weiche Gipsgestein zwischen den relativ härteren Sandsteinen und Vulkaniten als „Gleitschicht“ wirkte. Dafür spricht auch der Diapirismus im Ausbiss dieser Störungen.

Die Formation Auquilco ist von besonderer Bedeutung für den andinen Tunnelbau. Mächtige Abfolgen aus Gips, die unter entsprechend hoher Überlagerung auftreten, können den Bau eines Tunnels unmöglich machen, da die Zeit der Erstverformung nach dem Aushub kürzer ist als die Abbindezeit von Stützmaßnahmen.

Um hier mehr Klarheit über die Verhältnisse zu erlangen, wurden von GIAMBASTIANI (2005) umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass die einachsiale Druckfestigkeit des Gipses stark variiert und stark von der Porosität abhängig ist. Sie kann aber in Einzelproben überraschend hohe Werte erreichen.

Eine wesentliche Frage, bis zu welcher Tiefe Gips *ingesamt* auftreten kann, blieb unklar. Dies gilt auch für die Frage eines Zusammenhangs zwischen Druckfestigkeit und Überlagerung (über den Umweg des abnehmenden Porenvolumens mit zunehmender Überlagerung). Träfe dies zu, wäre die Problematik im Tunnelbau deutlich entschärft.

Formation Tordillo – (GULISANO et al. 1984). Oxford-Kimmeridge; auch: Formation Río Damas:

Die Formation Tordillo ist durch die Ähnlichkeit ihrer verschiedenen Fazien untereinander und ihrer Ähnlichkeit mit anderen Formationen der Gegend etwas komplexer zu beschreiben. Man gab den Namen Tordillo den detritischen, vulkanoklastischen und vulkanischen Gesteinen, die zwischen der Formation La Manga und der Gruppe Mendoza liegen. Dabei kam es zur Ausweisung der Subformationen Chacayano (unterhalb der Formation Auquilco), Subformation Tordillolitiense und in die Subformation Tordillo (s.s.).

Sowohl "Tordillo" Chacayano, als auch die Subformation Tordillo (s.s.) sind aus ähnlichen Gesteinen zusammengesetzt: Chaotische Konglomerate, mit subangularen Klasten von Kalken, vulkanischen Gesteinen und von grobkörnigen roten Sandsteinen, die in rote Tonsteine übergehen. Nur wenn die Gipse der Formation Auquilco auftreten, kann man die zwei Subformationen unterscheiden. Die Subformation Tordillolitiense (GROEBER et al. 1953) enthält vulkanische und vulkanoklastische andesitische Ablagerungen, die sich in die zuvor besprochenen detritischen Sequenzen einschalten.

SPALLETTI et al. (2008) zeigen in ihrer Arbeit über die Sedimentpetrographie der Formation Tordillo, dass vor allem die feinkornreichen Abschnitte mit Illiten und Smektiten durchwegs quellfähige Eigenschaften aufweisen, eine im Tunnelbau äußerst ungünstige Gesteinseigenschaft.

Formation Vaca Muerta – Gruppe Mendoza (Obere Jura) (GROEBER 1946, LEANZA & HUGO, 1978), auch: Formation San José:

Diese Formation ist aus marin-litoralen Gesteinen wie Kalken, fossilführenden, grauhellgrau bis ocker farbigen Kalkareniten, grau-schwarzen Tonsteinen, grünen Mergeln und roten bis grünen Sandsteinen zusammengesetzt. Im Westen ist sie zwischen den vulkanoklastischen Sequenzen der Formation Juncal durch tektonische Überschiebungen geschaltet. In der Schichtfolge kann man Niveaus von mikrokristallinem Gips und Anhydrit beobachten (Quebrada Navarro).

Formation Diamante / Cristo Redentor (Kreide) (AGUIRRE, 1960):

Die Sedimente der Formation wurden in einem transitionalen/kontinentalen Milieu gebildet. Sie bestehen aus roten Sandsteinen, roten Tonsteinen und roten Konglomeraten, die

den Hauptteil der Formation ausmachen. Untergeordnet finden sich Kalkarenite, Kalke und Tonsteine mit Linsen und Einlagerungen von Gips. Die Konglomerate sind matrixgestützt mit Klusten von Laven und auch manchmal von Sandsteinen und Tonsteinen verschiedener Größen (maximal dm-Bereich). Der obere Bereich der Formation Cristo Redentor, der mit der Formation Juncal in Kontakt steht, besteht aus Wechsellagerungen von Kalkareniten und grauen Tonsteinen. Deren Schichtmächtigkeiten liegen im dm-Bereich. Die Formation ist von zahlreichen Basaltgängen jüngerer Alters durchdrungen. Die Formation Cristo Redentor ist im Bereich der Grenze zwischen Chile und Argentinien in einer Mindestmächtigkeit von 800-900 m aufgeschlossen.

Die Formation Cristo Redentor könnte sich im Tunnelbau als problematisch darstellen. Die roten Tonsteine sind einerseits nicht fähig, größere Überlagerungen aufzunehmen. Andererseits lässt der Gips an der Oberfläche auf einen Anhydritgehalt in größerer Tiefe schließen, was wiederum zu Quellerscheinungen bei Wasserzutritt führen kann.

Formation Juncal (Kreide) (RAMOS et al. 1990), auch: Formation Los Prelambres.

Vulkanische und vulkanoklastische Sequenz, die durch Einschaltungen von Brekzien, vulkanoklastischen Konglomeraten, Sandsteinen und andesitischen Laven charakterisiert ist. Diese Formation liegt im Westen des geplanten Vorhabens und dominiert praktisch den gesamten chilenischen Abschnitt. In die Sequenz intrudierten Gänge und kleine Plutone mit variabler chemischer Zusammensetzung, wobei saure granitische bzw. granodioritische Zusammensetzungen dominieren.

In diesem Sektor scheint die Formation Juncal konkordant über der Formation Cristo Redentor zu liegen.

Die Formation Juncal entspräche auf der chilenischen Seite der Formation Abanico, die durch AGUIRRE 1960 definiert wurde.

Formation Agua de la Piedra – (YRIGOYEN, 1972). Oligozän:

Die Formation besteht vorwiegend aus Konglomeraten („Santa Maria“). Aus den Abfolgen dieser Formation setzt sich unter anderem der Cerro Penitentes zusammen. Außer den Konglomeraten treten auch Fanglomerate mit vulkanischen Komponenten (bis 30 cm Durchmesser) in einer feinkörnigen Matrix auf. Die Zementation der Sedimente weist auf ein fluviatiles Ablagerungsmilieu mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten hin. Die Formation verzahnt sich mit der Formation Farellones.

Formation Farellones – (RAMOS et al. 1990, CEGARRA et al. 1993). Miozän:

Diese Formation umfasst zahlreiche vulkanische Körper, die die älteren Formationen schneiden. Unter ihnen unterscheidet man die andesitischen Körper, charakterisiert durch ihre grüne Farbe, die feine Körnung und die hellgrauen dazitischen Körper mit porphyrischer Textur. Teilweise gibt es auch Rhyolit. Die Intrusivkörper liegen sowohl konkordant als auch diskordant vor und ihre Gesteine repräsentieren Magmatismus eines kontinentalen vulkanischen Bogens.

Quartär

Im Projektgebiet liegen zahlreiche quartäre Ablagerungen vor, die eine alluviale, detritische und glaziale Herkunft haben. Sie wurden in der Karte (Abbildung 44) nicht separat ausgewiesen. Von besonderer Bedeutung sind hier geomorphologische Prozesse, die im

Abschnitt „Geomorphologische Ablagerungen und Prozesse“ auf den Seiten 73 ff beschrieben werden.

Gesteinsarten

Andesit

Gestein mit überwiegend porphyrischer, selten afanitischer Struktur. Zusammensetzung: Großteils aus Matrix mit verschiedenen Farben (hellgrau bis schwarz) und einem Kristallanteil in der Matrix von 3 bis 35 %. Die Matrix enthält hauptsächlich Kristalle des Typs Plagioklas mit Größen von bis zu 3 cm und untergeordnet Fe-Mg-Mineralen. Teilweise liegen die Kristalle in einem teils stark alterierten Zustand vor. Selten sind Gasbläschen zu beobachten.

Die Geländeaufschlüsse zeigen Lavaflüsse im Meterbereich, die in die vulkanoklastischen Sequenzen eingeschalten sind und bizarre, primäre Flusstrukturen aufweisen.

Andesit findet sich vorwiegend in der Formation Juncal.

Basalt

Basalte können als dunkle, quarzarme und plagioklasreiche Gesteine beschrieben werden. Ferner zeigen sie afanitische bis porphyrische Strukturen. Sie gehören im Projektgebiet zu den Formationen Tordillo und Juncal. Auf Grund ihrer Ähnlichkeiten in Aussehen und Eigenschaften mit den Andesiten, ist es im Gelände üblich, die Basalte auch als „Basandesite“ zu bezeichnen. Sie treten in Form massiver Vulkanite und Vulkanoklastika in der Formation Tordillo und in Form von diskordanten Gängen in der Formation Cristo Redentor auf.

Vulkanoklastische Gesteine (Brekzie, Sandstein)

Vulkanoklastische Brekzien, überwiegend matrixgestützt, sporadisch klastengestützt. Die sehr harte Matrix ist zusammengesetzt aus Körnern im Millimeter bis Zentimeter-Bereich. Unter den Klasten befinden sich hauptsächlich Kristalle von Plagioklas, Mafiten und Quarz, Mikroklasten von Lava, Aschen und vulkanisches Glas. Die Farben variieren zwischen rötlich grau bis grün, abhängig vom Typ (Oxidation und Alteration zu Chlorit und Epidot) und Grad der Alteration.

Die durch die Matrix umschlossenen Klasten haben verschiedene Größen, die im Zentimeter- bis Meter-Bereich liegen und im Allgemeinen in eckiger bis leicht gerundeter Form vorliegen.

Die Brekzien sind sowohl mono- als auch polyolithisch. Die Klasten sind immer vulkanischer bzw. hauptsächlich andesitischer Herkunft. Sehr selten sind Aufschlüsse mit Klasten von Kalken. Diese Anomalie rührt bei Aufschlüssen bei Las Cuevas von dem nahen Kontakt dieser Gesteinstypen mit den Sedimenten der Formation Vaca Muerta her.

Diese Brekzien besitzen Mächtigkeiten im Meter-Bereich, die Steilwände von mehreren Zehnermetern bilden. In einigen Bereichen wechseln sich die Brekzien mit Sandsteinen und feinsten vulkanoklastischen Brekzien ab, die Schichten im Dezimeter- bis Meter-Bereich bilden.

Die Sandsteine sind aus Körnern verschiedenster Größe zusammengesetzt, von fein bis sehr grobkörnig, die in den Farben grau, rötlich und grün vorliegen. Die Körner, falls bestimmbar, setzen sich aus Quarzkristallen, Mafiten und Mikrokristallen aus Lavas zusammen.

Ignimbrit

Ignimbrite stellen vulkanische Gesteine dar, die aus pyroklastischen Dichteströmen entstehen. Es handelt sich bei ihnen hier um mittel bis schlecht sortierte Gesteine, in der Form von massiven oder geringmächtigen Ablagerungen. Charakteristisch für sie sind die durch die hohen Temperaturen bei der Entstehung verschweißten Klaster. Die Matrix ist reich an Glas, die Struktur ist chaotisch.

Die Ignimbrite im Projektgebiet gehören zur Formation Tordillo.

Rhyolithe

Rhyolithe sind helle vulkanische Gesteine, mit leicht rötlicher Färbung und erhöhtem Quarzgehalt und einer afanitischen bis porphyrischen Struktur. Sie treten im Projektgebiet als massive Vulkanite, Vulkanoklastika und Intrusionen auf. Im Gelände heben sie sich durch eine oberflächliche Verwitterungskruste rötlicher Farbe hervor.

Im Kartierungsgebiet wurden die Rhyolithe in der Formation Tordillo und als diskordante Gänge in der Formation Choiyoi gefunden.

Granite, Granodiorite und Tonalite

Granite, Granodiorite und Tonalite im Projektgebiet entsprechen dem Typ I und entstammen zwei Phasen von Intrusionen. Im Perm gab es eine Intrusion von Magmen („Granito Cruz de Caña“) in das Basement (Formation Alto Tupunguato). Diese befindet sich im argentinischen Teil des Projektes und besitzt eine granitische bis tonalitische Zusammensetzung. Weitere granitisch-tonalitische Intrusionen gab es im Miozän. Diese stecken z.B. in der Quebrada Juncal diskordant in den Gesteinen der Formation Juncal. Dort bilden sich in den Vulkanoklastika um die intrudierten Granodiorite Alterationsaureolen im Zusammenhang mit Kontaktmetamorphose.

Dazite

Dazite treten im Gelände meist als schichtparallele Gänge auf. Von den Gängen können mitunter Abzweigungen in unterschiedliche Richtungen erfolgen. Sie korrespondieren einem obermiozänen vulkanischen Ereignis, dem auch der Gipfelaufbau des Aconcagua entspricht.

Lutite

Die Lutite im Projektgebiet sind überwiegend rot, manchmal grün und treten in feinstgeschichteten bis dm mächtigen Lagen auf. Auf Grund der Feinheit der Komponenten ist es quasi unmöglich, die Zusammensetzung makroskopisch zu bestimmen. Nur selten findet man lithische Mikroklasten in den Lutiten.

In den Aufschlüssen wechseln sich oft Lagen von Lutiten und Sandsteinen ab und im Kontaktbereich der zwei Sedimentarten findet man Gipsbeläge.

Aufgrund des vulkanischen Einzugsgebiets ist davon auszugehen, dass alle Lutite Anteile von quellfähigen Tonmineralen aufweisen (Smektite, Illite, Montmorillonite u.a.) – in SPALLETTI et al. (2008) zumindest für die Formation Tordillo nachgewiesen. Dies weist darauf hin, dass die Lutite zumindest teilweise quellfähig sind.

Mergel

Im Projektgebiet stellen Mergel einen Teil der Formation La Manga und Vaca Muerta dar, in Form von klassischen Mergeln (65 % CaCO₃, 35 % Ton) und von kalkreichen Mergeln (75% CaCO₃, 25% Ton). Die Schichtung der Sedimente ist ausgeprägt und sie treten häufig in Wechsellagerung mit Kalken und Lutiten auf.

Sandstein

Sandstein der Formation Vaca Muerta.

Im Projektgebiet treten grüne und rötliche Sandsteine auf, mit Korngrößen von fein bis grob, die manchmal sogar die Körnung von Mikrobrekzien und Mikrokonglomeraten erreichen. Im Allgemeinen, bei genügend großen Körnern, erkennt man gerundete Quarzkristalle und rote Mikroklasten. Die Matrix scheint aus feinen Glaspartikeln zusammengesetzt zu sein.

In den Aufschlüssen zeigen sich die Sandsteine im cm bis dm Bereich geschichtet, manchmal auch mit Kalken und Tonsteinen vergesellschaftet.

Sandstein der Formation Cristo Redentor

Hier handelt es sich um rötliche Sandsteine, die fein bis mittelkörnig ausgebildet sind. Die Körner bestehen aus Quarz und sind vulkanischer Herkunft.

Grauwacken

Bei den Grauwacken handelt es sich um Sandsteine mit Komponenten verschiedener Lithologien, hauptsächlich Quarz und Feldspat. Im Projektgebiet sind sie durch die Formation Alto Tupungato präsentiert.

Konglomerate

Konglomerate der Formation Cristo Redentor

Es handelt sich um rote und matrixgestützte Konglomerate, die aus Körnern mit Größen im mm bis cm-Bereich zusammengesetzt und sehr hart sind. Unter den Körnern erkennt man Kristalle und Mikroklasten von Laven, Tonsteinen und rötlichen Sandsteinen der gleichen Herkunft wie die die groben Klasten.

Die Klasten besitzen unterschiedliche Größen, zwischen wenigen Zentimetern bis zu 70 cm und besitzen meist eine gerundete Form. Mehrheitlich sind sie aus andesitischen Gesteinen zusammengesetzt und in geringerem Maße aus Lutiten und roten Sandsteinen.

In den Aufschlüssen findet man sie geschichtet mit Bankmächtigkeiten vom Dezimeter bis zum Meter-Bereich. Manchmal alternieren die Konglomerate auch mit Schichten von Sandsteinen von mehreren cm Mächtigkeit und Schichten von Mikrokonglomeraten.

Konglomerate der Formation Agua de la Piedra

Graue, Korn- oder matrixgestützte Konglomerate, die aus Körnern mit Größen im mm bis cm- Bereich zusammengesetzt und sehr hart sind. Sie treten wandbildend auf.

Kalk der Formation Vaca Muerta

In dieser sedimentären Formation können zwei verschiedene Arten von Kalken beobachtet werden: Eine mit dunkelgrauer und eine mit heller Farbe. Beide zeigen eine mikrokristalline Struktur. Jedoch finden sich in den hellen Kalken mehr detritische Niveaus, bis hin zu einem Übergang zum Kalkarenit. Diese hellen, detritischen Kalke enthalten fossilreiche Schichten (z.B. Ammoniten bis 10 cm Durchmesser).

In den Aufschlüssen treten die Kalke gebankt auf, mit Bankmächtigkeiten die vom Zentimeter- bis zum Dezimeter-Bereich schwanken. Häufig treten die Kalke auch in Wechsellagerung mit Sandsteinen und Lutiten auf.

Anhydrit und Gips

Sowohl der Anhydrit als auch der Gips können von evaporitischer oder hydrothermalen Herkunft sein.

Im Projektgebiet gibt es Gips und Anhydrit in den Formationen Auquilco und Cristo Redentor. Für die tektonischen Überschiebungen diente die Formation Auquilco vielfach als Gleithorizont.

Entlang der wichtigsten tektonischen Überschiebungen sind an der Oberfläche Diapiere aufgeschlossen, die teils auch zum Zweck der Rohstoffgewinnung abgebaut werden.

Geomorphologische Ablagerungen und Prozesse

Für die ausgeprägten geomorphologischen Prozesse ist eine Reihe von Faktoren ausschlaggebend:

- Starkes Relief. Es handelt sich um die Bergspitzen, die mit dem Aconcagua etwa 7.000 m Höhe erreichen. Der Río Mendoza hingegen liegt bei Punta de Vacas auf einer Höhe von weniger als 2.400 m. Der Reliefunterschied liegt somit bei 4.600 m.
- Niederschlag. Nur wenige hundert Kilometer weiter nördlich, beim Agua Negra Tunnel, gibt es aufgrund der semiariden Verhältnisse kaum Niederschlag – hier verhält sich die Situation anders. In diesem Untersuchungsraum liegen die Abflüsse der Oberflächengewässer bei 7,2 l/s.km² (Río de las Cuevas) und 25,3 l/s.km² (Río Juncal, beide Angaben aus SCHOTTE, 2011), was auf vergleichsweise beachtliche Niederschlagsmengen schließen lässt.
- Vergletscherung. Im Bereich des Agua Negra Tunnel gab es nur unbedeutende Gletscher, Hinweise auf ein ehemals zusammenhängendes Eisstromnetz fehlen komplett. Hier hingegen existierte eine maßgebliche Vergletscherung.
- Zerlegung. Durch eine kompressive Überschiebungstektonik mit zahlreichen, hintereinander geschalteten Störungen, die wiederum Zweigstörungen in das Gebirge entsenden, ist das Gebirge stark zerlegt.

- Lithologie. Die Gesteine der Formationen Choiyoi und Juncal sind im Vergleich weniger anfällig für Massenbewegungen als die gesamte Sequenz der meist terrigenen (vulkano-)marinen Sedimente von Jura und Kreide.
- Präsenz löslicher Gesteine. Leicht lösliche Gesteine können Massenbewegungen auslösen und sind im Großraum des Aconcagua immer wieder aufgeschlossen.
- Erdbeben. ANTINAO & GOSSE (2008) stellen Rutschungen und Felssturzereignisse jungkänozoischen und rezenten seichten Erdbeben gegenüber. Auch hier stellt sich wieder die Situation dar: Im Raum Agua Negra Tunnel gibt es keine oberflächennahen Erdbeben, im Bereich Aconcagua sehr wohl. (In der gleichen Arbeit wird allerdings eine maßgebliche Rolle des Klimas und der damit verbundenen Glaziologie im Bereich des Aconcagua Fold Trust Belts hervorgehoben.) Auch MOREIRAS (2004, 2005a, 2005b, 2006) hebt neben Hangneigung, Lithologie und Niederschlägen eine Erdbebensuzzeptibilität hervor.

5.3 Hydrogeologie

Hydrogeologische Aufnahme und Rahmenbedingungen

Im Projektgebiet wurden im Sommer 2008 84 Wasserproben von Quellen und Bächen gezogen und einer Laboranalytik zugeführt. Die im Gelände gemessenen Parameter waren pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit und Temperatur, die Schüttung wurde teils gemessen, teils geschätzt.

Die regionalen klimatischen Daten stammen von der "Estadística Climatológica del Servicio Meteorológico Nacional" in Buenos Aires und gehen auf Daten der Wetterstationen Puente del Inca (Höhe: 2.720 m) und Cristo Redentor (3.829 m) (BÖFER et al., 2008, SCHOTTE, 2011).

Generell liegt eine Zunahme des Jahresniederschlages Richtung Westen, hin zur Grenze Argentinien-Chile (Wasserscheide) vor. Die Jahresniederschläge westlich der Grenze liegen bei ca. 740 mm und unmittelbar östlich davon (Argentinien) bei ca. 510 mm (SCHROTT, 2002). Im Gebiet um den Cerro Tres Gemelos, auf Höhen um 4.000 m und darüber, liegen die Niederschläge bei ca. 800 mm bis 900 mm.

Gemäß SCHOTTE (2011) beträgt die mittlere Jahresabflussrate des Río de las Cuevas rund 4,7 m³/s, was einer Abflussspende von rund 7,2 l/s/km² oder einem Gebietsabfluss von circa 229 mm entspricht. Der mittlere Jahresabfluss des Río Juncal in Chile beläuft sich auf rund 5,9 m³/s, was einer Abflussspende von rund 25,3 l/s/km² oder einem Gebietsabfluss von etwa 798 mm entspricht.

SCHOTTE (2011) ermittelte theoretische Werte der *potentiellen* Evapotranspiration gemäß THORNTWAITE (1948), HAUDE (1955), ALBRECHT (1962) und TURC (1961) für Puente del Inca, Cristo Redentor und Los Rieillos. Er verwendete das Verfahren von TURC (1961) für Lufttemperaturen über 5°C, darunter jenes von IVANOV (WENDLING & MÜLLER, 1984), eine Modifikation des TURC Verfahrens.

In BÖFER et al. (2008) wurde die reelle Evaporation mittels der Methode von TURC (1961) für drei Gebiete berechnet (Tabelle 05):

- Gebiet westlich der hydrologischen Trennlinie, genannt „Cristo Redentor West“

- Gebiet östlich der hydrologischen Trennlinie, genannt „Cristo Redentor Ost“
- Gebiet um „Puente del Inca“

Tabelle 05 Evapotranspiration im Projektgebiet (berechnet nach TURC, 1961).

Gebiet	Jahresmitteltemperatur [°C]	Niederschlag [mm/a]	Evapotranspiration [mm/a]
Cristo Redentor West	-1.7	740	244
Cristo Redentor Ost	-1.7	510	232
Puente del Inca	8.0	280	257

Die Werte von Puente del Inca können gut mit denen von SCHOTTE (2011) verglichen werden. Dieser ermittelte 270 mm/a für Puente del Inca auf Basis von etwas höheren Niederschlagsmengen, die reelle Evaporation der Stationen Cristo Redentor wurde mit 211 mm/a und jene von Los Riecillos mit 419 mm/a beziffert (SCHOTTE, 2011).

Die Grundwasserneubildung wurde in SCHOTTE (2011) punktuell für die drei genannten Stationen (Puente del Inca, Cristo Redentor und Los Riecillos) ermittelt. Da in einigen Monaten die Evaporation höher ist als der Niederschlag, entstehen jeweils im Jahresmittel deutlich negative Werte.

BÖFER et al. (2008) gehen in einem vereinfachten Ansatz von einem Anteil des unterirdischen Abflusses von etwas 20 % des Gesamtabflusses aus (Tabelle 06).

Tabelle 06 Schätzung von Oberflächenabfluss und Grundwasserneubildung.

Gebiet	Oberflächenabfluss [mm/a]	Grundwasserneubildung [mm/a]	Unterirdischer Abfluss [l/s/km ²]
Cristo Redentor West	397	99	3,1
Cristo Redentor Ost	222	56	1,8
Puente del Inca	18	5	0,1

Hydrochemie der Quellen und Bäche

Die Konzentrationen wesentlicher Ionen der Ionenbilanz sind in Abbildung 45 dargestellt. Der Chemismus des Wassers der Quelle 16, der Puente del Inca Quelle, weicht wegen hoher Konzentrationen von Natrium, Calcium und Chlorid deutlich vom Chemismus der übrigen Quellen ab.

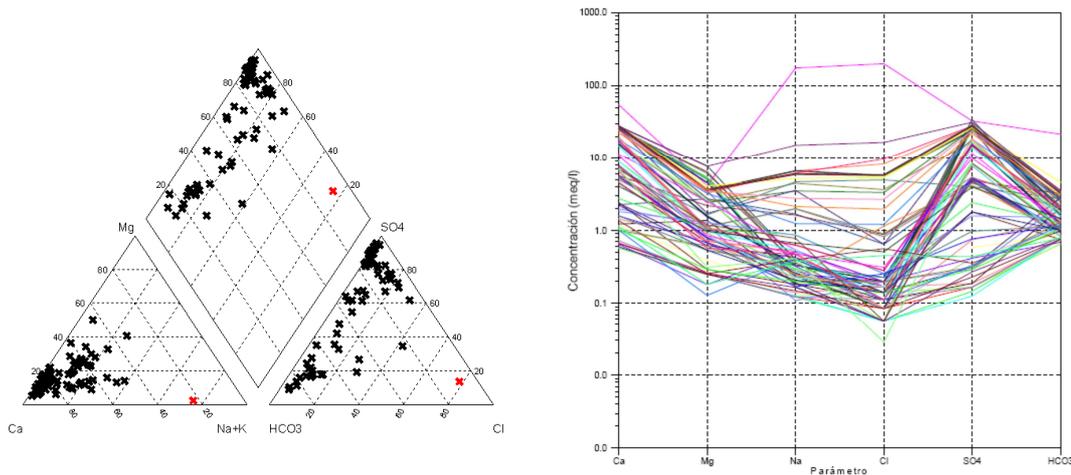


Abbildung 45. Die Grafiken zeigen die Prozentanteile und Konzentrationen der Ionen der beprobten Wässer im Projektgebiet. Das Wasser der Quelle 16 bei Punte del Inca wird als roter Punkt im Piper Diagramm und durch die rosa Linie im oberen Bereich des Schoeller Diagramms hervorgehoben

Gehalt und Verhältnis der Kationen (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) und Anionen (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) variieren merklich innerhalb des Projektgebiets. So konnte eine Vielzahl an verschiedenen Wassertypen beobachtet werden, mit Ca-Mg- HCO_3 und Ca- SO_4 als die dominanten Typen (siehe Anhang 3).

Quellen mit Wässern des Typs Ca-Mg- HCO_3 und einem Gehalt von Na < 10 mg/l haben üblicherweise eine geringere Mineralisierung ($\kappa < 300 \mu\text{S/cm}$). Es ist davon auszugehen, dass Wässer dieses Typs an der Lösung von karbonatischen Mineralen und oder an der inkongruenten Hydrolyse von Silikaten (Feldspäte, Glimmer) in vulkanischen Gesteinen beteiligt sind.

Die hohe Zahl an Wässern des Typs Ca- SO_4 kann mit der Lösung von Gips in Verbindung gebracht werden. Gips kommt im Projektgebiet reichlich vor. Diese Wassertypen zeigen einen hohen Mineralisierungsgrad ($\kappa = 1.500\text{-}3.000 \mu\text{S/cm}$).

Der Typ Na-Ca-Cl der Termalquelle bei Punte del Inca deutet auf eine weit vortgeschrittene Interaktion zwischen Wasser und Gestein hin (reife Wässer mit fast neutralen pH-Werten).

Isotopenhydrologie

Beim Projekt Corredor Bioceánico Aconcagua wurden bislang noch keine systematischen Isotopenwerte erhoben. Einzig die Frage nach der Herkunft der Wässer der Punte del Inca Quelle veranlasste den Verfasser, im August 2008 je zehn Liter der Quellen 16 (Punte del Inca) und 17 (Referenzquelle im Tal gegenüber, bei der ehemaligen Bahnstation „Las Leñas“) zu beproben, einer Hydrochemie nach europäischem Standard und einer umfangreichen Isotopenanalytik zuzuführen (Tabelle 07).

Tabelle 07 Resultate der Isotopenuntersuchungen an den Quellen 16 „Puente del Inca“ sowie an einer Referenzmessstelle auf der gegenüber liegenden Talseite.

Untersuchung – Isotop	Probe 16 (Puente del Inca)	Probe 17 (Las Leñas, Bereich Nord)	Anteil bzw. Einheit
Sauerstoff 18	-18,24	-18,98	‰
Deuterium	-144	-143,4	‰
Deuterium Exzess	1,9	8,4	‰
Tritium (H3)	1,1 ± 0,4	2,7 ± 0,5	TU
Schwefel 34	15,4	15,2	‰
Sauerstoff 18 des Sulfats	10,2	11,4	‰
Strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)	0,707495 ± 0,000032	0,706904 ± 0,000016	‰

Die Ergebnisse werden gemeinsam mit denen der Hydrochemie diskutiert.

Hydrogeologisches Modell

Die Modellfindung basiert auf folgenden Erhebungen:

- Geländekartierung mit Messung der vor-Ort-Parameter, Probenahme und Laboranalytik
- Geologisches Modell
- Hydrogeologisches Modell in RAMOS (1993)

Die Ergebnisse der Kartierung und der Laboranalytik wurden räumlich erfasst und eine hydrogeologische Charakterisierung und Ausweisung von hydrochemischen Bereichen erstellt.

Hydrochemische Bereiche

Bisher hat die Analyse der hydrochemischen Daten zu einer Untergliederung des Projektgebietes in sechs verschiedene hydrochemische Bereiche geführt (siehe Abbildung 46).

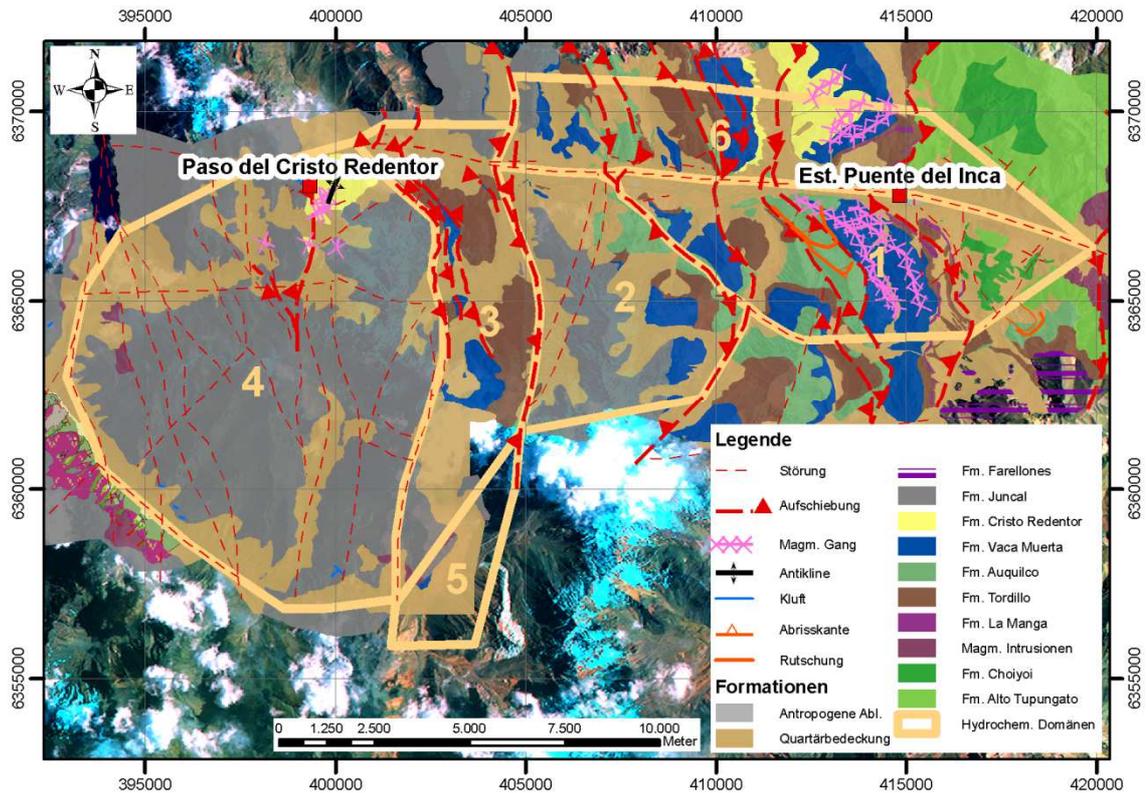


Abbildung 46. Hydrochemische Bereiche 1 bis 6, mit Penitentes Störung im Osten und Quebrada Juncal im Westen.

Bereich 1

Der Bereich 1 liegt im Osten des Projektgebietes und ist durch eine Vielzahl von Wässern mit Ca-SO_4 -Mineralisierung (κ um $3.000 \mu\text{S/cm}$) charakterisiert. Im diesem Bereich liegen auch die Thermalwässer von Puente del Inca (Quelle 16, Chemismus Na-Ca-Cl, Temperaturen bis 35°C). Richtung Norden ist dieser Bereich durch die W-E streichende Hauptstörung limitiert, die parallel zum Río Las Cuevas verläuft. Im Westen stellt die Grenze eine Überschiebung dar, die hier Nordwest-Südost streicht und den zentralen Bereich des Río Blanco kreuzt. Alle Wasserproben aus diesem Gebiet (mit einer Ausnahme) zeigen Werte von Cl^- ($>30 \text{ mg/l}$). Der erhöhte Chloridgehalt dieser Wässer erklärt sich durch den Prozess der Mischung und/oder Lösung durch das aufsteigende Thermalwasser, in Verbindung mit der Puente del Inca Quelle (Abbildung 47). Dies könnte bedeuten, dass praktisch alle Quellen in diesem Bereich zumindest teilweise durch die Thermalwässer von Puente del Inca gespeist werden oder mit ihnen in Verbindung stehen.

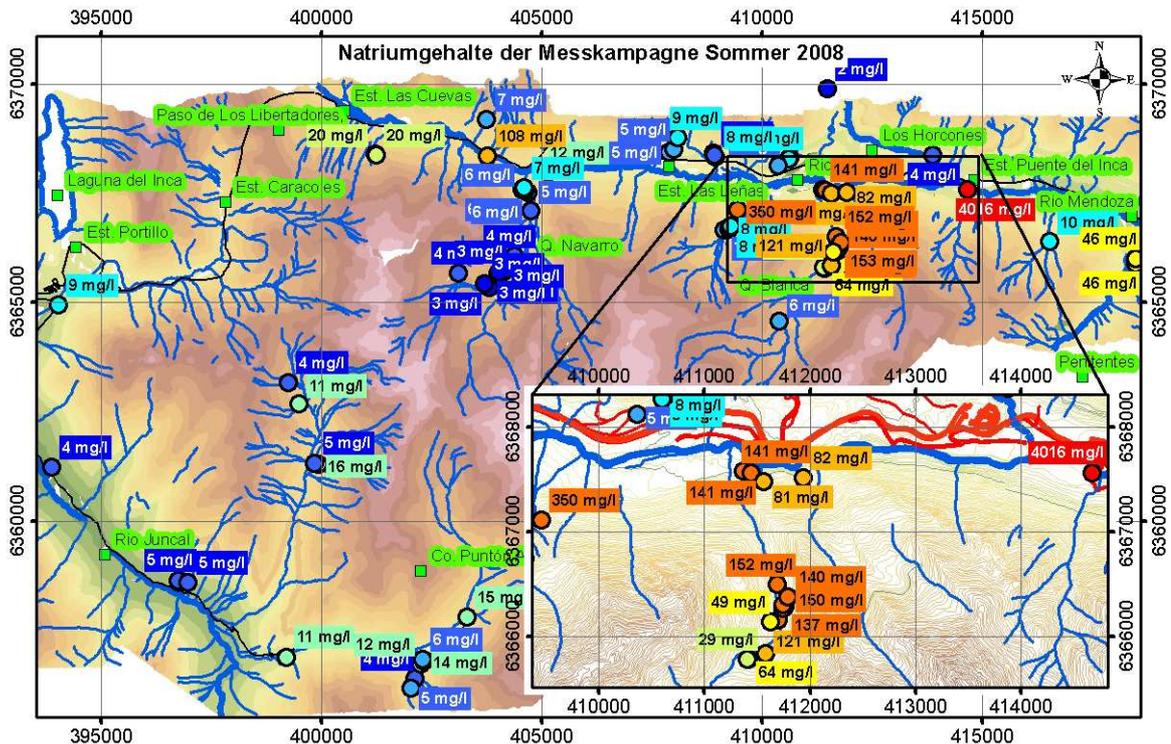


Abbildung 49. Natriumgehalt im Untersuchungsgebiet der Messkampagne Sommer 2008.

Bereich 2

Ebenso wie im Bereich 1, dominieren Ca^{2+} - und SO_4^{2-} -Ionen den Chemismus der Wässer der Quellen im Hydrochemiebereich 2. Die natürlichen Grenzen dieses Bereichs sind eine Überschiebung mit Richtung Nordwest-Südost, welche den zentralen Bereich des Río Blanco kreuzt, die west-ost streichende Las Cuevas Störung im Norden und die große nord-süd streichende Störung, die durch die Quebrada de los Gemelos läuft (Abbildung 41, Abbildung 46). Im Vergleich zu den Quellen im Bereich 1, haben die Wässer der Quellen im Hydrochemiebereich 2 eine geringere Mineralisierung (κ zwischen 500 und 1.600 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Mit der Ausnahme von Quelle 25 haben sie sehr niedrige Na^+ und Cl^- -Gehalte ($<10 \text{ mg/l}$). Deren Wässer weisen einen in diesem Bereich anormalen Gehalt an Na^+ (5 mg/l) und Cl^- (41 mg/l) auf.

Bereich 3

Die Wässer der Quellen des Bereichs 3 kann man allgemein als Wässer des Typs Ca-Mg-HCO_3 klassifizieren. Sie besitzen einen niedrigen bis mittleren Grad an Mineralisierung ($\kappa = 100\text{-}480 \mu\text{S}/\text{cm}$). Andere Ionen wie Na^+ und SO_4^{2-} sind ebenfalls häufig, aber in geringerer Konzentration vorhanden. Eine Ausnahme bildet die Quelle 41, deren Wässer eine moderat erhöhte Mineralisierung aufweisen ($\kappa = 1355 \mu\text{S}/\text{cm}$) und als Typ $\text{Ca-Na-Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$ ausgewiesen werden können. Die Quelle 41 ist die einzige in diesem Bereich, die Chloridkonzentrationen von mehr als 10 mg/l aufweist. Dieser Hydrochemiebereich ist im Osten durch die Störung Quebrada Navarro (Nord-Süd-streichend), und im Westen durch die Las Cuevas Störung, die die Formationen Tordillo, Auquilco und Grupo Mendoza von der Formation Juncal trennt, begrenzt (Abbildung 41, Abbildung 46).

Bereich 4

Die Hauptionen der Wässer der Quellen des Hydrochemiebereichs 4 sind Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- und SO_4^{2-} , mit niedrigeren Gehalten an Na^+ und Cl^- (<20 mg/l). Der Mineralisierungsgrad der Wässer ist gering bis moderat hoch ($\kappa = 100\text{-}1200 \mu\text{S/cm}$), wobei die Wässer der stärker mineralisierten Quellen dem Typ Ca-SO_4 zugerechnet werden können. Dieses Phänomen ist im Zusammenhang mit der Lösung von Gips (Quellen 71 und 81) zu sehen. Der Hydrochemiebereich 4 ist im Osten durch die Las Cuevas Störung begrenzt. Im Süden und Westen definiert der Verlauf des Río Juncal die Grenze des Bereichs.

Bereich 5

Die Gesamtheit der Wasserproben der Quellen dieses Bereichs kann als Typ Ca-SO_4 (~900-1900 $\mu\text{S/cm}$) eingestuft werden. Dieser Umstand steht in Zusammenhang mit der Lösung von Gips aus den Nord-Süd streichenden Gesteinsschichten (Formation Auquilco), die westlich des Cerro Tres Gemelos auftreten.

Zudem wurde festgestellt, dass die Quellen mit Wässern des Typs Ca-SO_4 im Bereich 5 (und im Bereich 4) im Vergleich zu den Ca-SO_4 Wässern der Bereiche 1, 2 und 6 ein unterschiedliches Ca/Sr Verhältnis haben. In den Bereichen 4 und 5 liegt das mittlere Verhältnis von Ca/Sr der Wässer des Typs Ca-SO_4 um 350 (Werte zwischen 264 und 515); in den Bereichen 1, 2 und 6 jedoch ist das mittlere Verhältnis von Ca/Sr bei rund 245 (146 bis 325). Dies weist darauf hin, dass der Gips/Anhydrit in den Bereichen 1, 2 und 6 einen anderen Ursprung hat, als der Gips in den Bereichen 4 und 5.

Bereich 6

Alle Quellen die im Gebiet links des Río Las Cuevas (bzw. nördlich der W-E-Hauptstörung) liegen, gehören zum Bereich 6. Die Wässer der Quellproben können den Typen Ca-SO_4 und Ca-Mg-HCO_3 zugeordnet werden. Die Konzentration von NaCl in den Wässern ist durchwegs gering (<10 mg/l), ganz im Gegensatz zu den Quellwässern im Bereich 1. Dies weist darauf hin, dass die Quellwässer im Bereich 6 nicht mit den aufsteigenden und NaCl reichen Thermalwässern von Puente del Inca des Bereichs 1 in Kontakt sind.

Konzeptionelles Modell

Das Modellgebiet ist im Wesentlichen ein Kluftgrundwasserleiter. Dazite, Andesite, Tuffe, vulkanische Brekzien, Tonsteine, Sandsteine und Konglomerate sind Träger von kluftgebundenem Grundwasser. Dabei weisen die Sandsteine und Konglomerate Doppelporosität auf. Kalk, Anhydrit und Gips treten als Kluft- und als Karstgrundwasserleiter auf. Anhydrit wird bei Kontakt mit Wasser rasch zu Gips umgewandelt, somit dürften Klüfte im Anhydrit sehr schnell wieder verheilen, es sei denn, der Wasserdruck überschreitet 1.100 bis 1.500 m (Grenzdruck für Gipsbildung gemäß KEULEN et al. (2001), zusammengefasst in GIAMBASTIANI, (2005) bzw. 2.320 m (bei 50°C in XIE PING & BEAUDOIN, 1992). Hohlräume im Kalk bleiben hingegen bis zu höheren Tiefen stabil. Somit ist nahezu im gesamten Projektgebiet mit den jeweiligen Grundwasserleitertypen zu rechnen – rein aufgrund der Überlagerungen gibt es kaum Einschränkungen.

Es zeigt sich bei Betrachtung der hydrochemischen Bereiche, dass größere Störungen eher als Trennlinien zwischen den hydrogeologischen Systemen zu verstehen sind.

In den Talböden und auf den Bergflanken treten wenig verfestigte quartäre Ablagerungen auf (Alluvium, Kolluvium, glazigene Sedimente, Hangrutschungen, etc.), in denen sich Porengrundwasservorkommen gebildet haben. Deren Wässer treten entweder über Verengungsquellen an die Oberfläche aus oder sie sickern in geklüftetes Gestein und in die Karsthohlräume ein.

Es ist davon auszugehen, dass es hydraulische Verbindungen zwischen den verschiedenen Karst-, Kluft- und Porengrundwasserleitern gibt.

Die Mächtigkeit der quartären Ablagerungen in den Talböden ist nicht bekannt, wird aber auf Basis geometrischer und geomorphologischer Überlegungen auf mehrere hundert Meter geschätzt. Die Fließrichtung des Grundwassers in diesen Porenaquifere ist meist hangabwärts, der Topographie folgend. Die Produktivität dieser Porenaquifere hängt hauptsächlich von ihrer Mächtigkeit und Zusammensetzung ab.

Generell dürfte das aktuelle Niveau der großen Flüsse, die meist als Vorflut wirken (Río Juncal und Río Las Cuevas) für alle Grundwasserleitertypen als Niveau des niedrigsten Grundwasserspiegels angesehen werden. Die Mehrzahl der dokumentierten Quellen entspringt nahe oder ausserhalb der Talböden, was diese Hypothese unterstützt.

Die Basisschüttungsmengen der aufgenommenen Bäche und Flüsse setzen sich aus dem Gletscherabfluss und der Neubildung aus den drei Grundwassertypen zusammen.

Es wird davon ausgegangen, dass der Hauptteil der kompressiven Störungen im Projektgebiet ein aktives Fließsystem in bevorzugter Richtung N-S bis NO-SW ausgebildet hat. Die Störungen wirken somit als Grundwasserleiter in longitudinaler Richtung entlang ihres Streichens und als Barrieren fürs Grundwasser in senkrechter Richtung auf ihr Streichen (Dränwirkung). Dabei wird davon ausgegangen, dass die eigentliche Störungsfläche als Geringleiter fungiert, die die Störung begleitende Zerrüttungszone als Grundwasserleiter. Die Drainage dieser Bereiche scheint bevorzugt dort stattzufinden wo sich diese Strukturen kreuzen bzw. in Täler ausstreichen.

Der Chemismus der Wässer, ihre teilweise artesische Natur, als auch die Präsenz von Thermalwässern weisen auf ein sehr aktives System von Grundwasserflüssen hin. Dieses System reicht im Bereich der marinen Sedimente und Evaporite des Mesozoikums (Formationen Auquilco und Vaca Muerta) in Tiefen von bis zu mehr als 2 km. Bei den Geländearbeiten wurde das Vorkommen von Karstsystemen dokumentiert, eine systematische Dokumentation wie in Europa gibt es hier nicht.

Die Untergrenze der Verkarstung wurde nicht untersucht und wird im Bereich der Basis der Täler (unter der Lockermaterialbedeckung) angenommen. Das Phänomen von Karsthohlräumen im Gips wurde in Deutschland bis in mehrere hundert Meter Tiefe unter der Erdoberfläche beobachtet (300-400 m, KEMPE, 1996). In Störungsbrekzien oder inkompetenten Gesteinen, besonders wenn die weichen Gesteinsanteile leicht durch Wasser gelöst werden können (z.B. Gips, Anhydrit), ist die Entstehung von porösen Zonen mit hohen Permeabilitäten bis in Tiefen von 600-800 m unter der Erdoberfläche möglich.

Modelle für die Thermalquelle Puente del Inca

Die Trasse des geplanten Basistunnel des Corredor Bioceánico Aconcagua verläuft etwa 700 m unterhalb des Austritts der etwa 35°C warmen Quelle (Nr. 16, siehe Abbildung 50).

Für die Planung des Tunnels ist das Wissen über Funktionsweise und Einzugsgebiet dieser Quelle, die durch die starke chemische Sedimentation eine Naturbrücke über den Río Horcones bildet, fundamental. Im ungünstigsten Fall ist die Machbarkeit in Frage gestellt. Im Zuge der weiteren Planung ist ein umfassendes Maßnahmenpaket für die Erkundung der gesamten Hydrogeologie des Basistunnels im Allgemeinen und der Quelle im Speziellen vorgesehen.



Abbildung 50. Die Quelle, die Gebäude der Therme und die Brücke "Puente del Inca".



Abbildung 51. Die Quelle Puente del Inca mit starken Ausgasungen an ihrem Hauptaustritt.

Es liegen mehrere Modelle über die Entstehung und Herkunft der Thermalwässer von Puente del Inca vor (Zusammenfassung der bisherigen Forschungsarbeiten in RAMOS 1993 und 2009).

Eine Modellvorstellung ordnet die Thermalwässer einer remanenten vulkanischen Aktivität zu, die mit den Trachyten bei Puente del Inca in Zusammenhang steht (SCHILLER, 1912 und CORTI, 1924; schematische Darstellung: Abbildung 53). Nach RAMOS ist dieses Modell unwahrscheinlich, da das Alter der Vulkanite bereits ca. 15 mio. Jahre beträgt.



Abbildung 52. Profil/Skizze von RAMOS (1993) und Foto des Gebiets um die Puente del Inca Quelle.

Eine andere Vorstellung von RAMOS (1993) besagt „die tiefen Temperaturen der Wässer, ca. 35°C, lassen den Schluss zu, dass die selbigen Wässer durch Infiltration in Bereichen eines normalen geothermischen Gradienten entstehen“. Zudem stellt er fest, dass „die chemischen Charakteristiken der Wässer ... kohärent sind mit der Lösung von mesozoischen Gipsen und Karbonaten“ (Abbildung 52, Abbildung 54). Demzufolge versickern die Wässer im Bereich der Gipsdiapire im Bereich der Quebrada Navarro und der Falla Las Leñas. Unter diesen Diapiiren folgen sie – auch in Hohlräumen des Gipses – den Störungen (der Aufschiebungen) bis zur basalen Überschiebung. Auf dieser gelangen sie bis zu deren erstem (niedrigsten) Kontakt mit der Oberfläche, was tatsächlich genau bei der Ortschaft Puente del Inca der Fall ist: Die basale Überschiebung des thin-skinned Aconcagua Fold Thrust Belt (Abbildung 40, Abbildung 41 und Abbildung 52), abgebildet durch die Störung Penitentes, kreuzt bei Puente del Inca die orthogonal, also Ost-West verlaufende Störung entlang des Las Cuevas Tales.

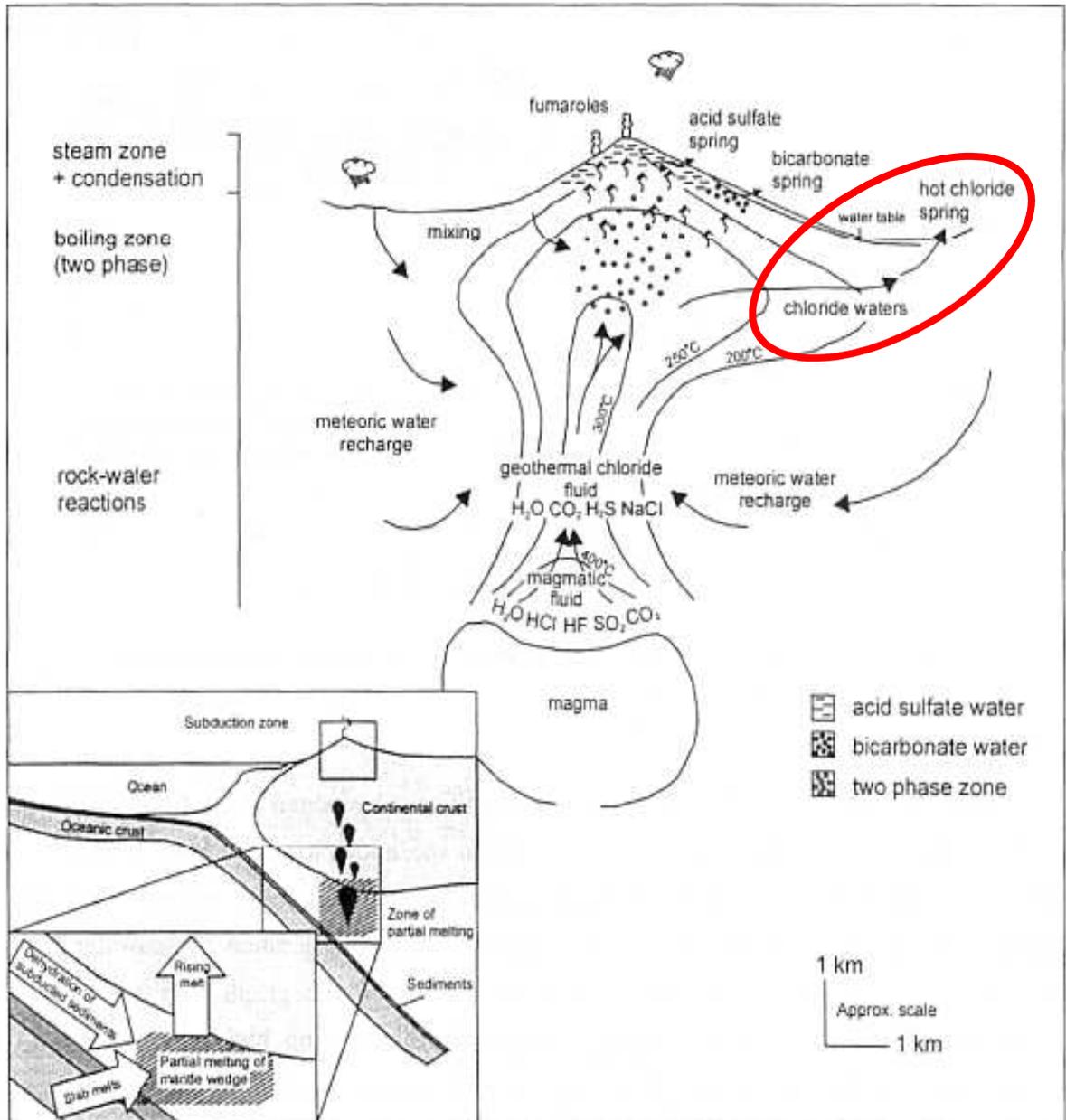


Abbildung 53. Skizze nach MARINI (2000). Die mögliche Herkunft der Thermalquelle von Puente del Inca ist in Rot markiert.

Mit dieser Erklärung allein wird das Phänomen der Puente del Inca Quelle zumindest auf den ersten Blick nicht erklärbar sein, führt man sich die wesentlichsten Punkte von RAMOS (1993) vor Augen:

- 1) Die „hohen Temperaturen der Wässer“ können nicht durch einen normalen geothermischen Gradienten erklärt werden. In einem hydrogeologischen Regime, in dem frische Wasser mittels Hohlräumen im Gips sehr schnell in den Untergrund auf eine Tiefe von 1-2 km gelangen, ist der geothermische Gradient geringer als im Mittel.
- 2) „Die chemischen Charakteristiken der Wässer sind kohärent mit der Lösung von mesozoischen Gipsen und Karbonaten“. Dies trifft für viele Quellen, die sich im Bereich Cristo Redentor, Quebrada Navarro und Quebrada Juncal befinden, zu, aber nicht bei Puente del Inca. Das Wasser der Thermalquelle Puente del Inca enthält 11 g/l NaCl.

Kaum eine der anderen Quellen enthält Salz in nennenswerten Mengen – lediglich einige Quellen im Umkreis der Puente del Inca. Ebensovwenig liegen in der Literatur Angaben über haline Evaporite vor, sie wurden auch bei den Geländearbeiten nicht vorgefunden.

- 3) RAMOS geht nicht auf die Zonen mit hydrothermalen Alterationen im Umkreis der Puente del Inca ein.

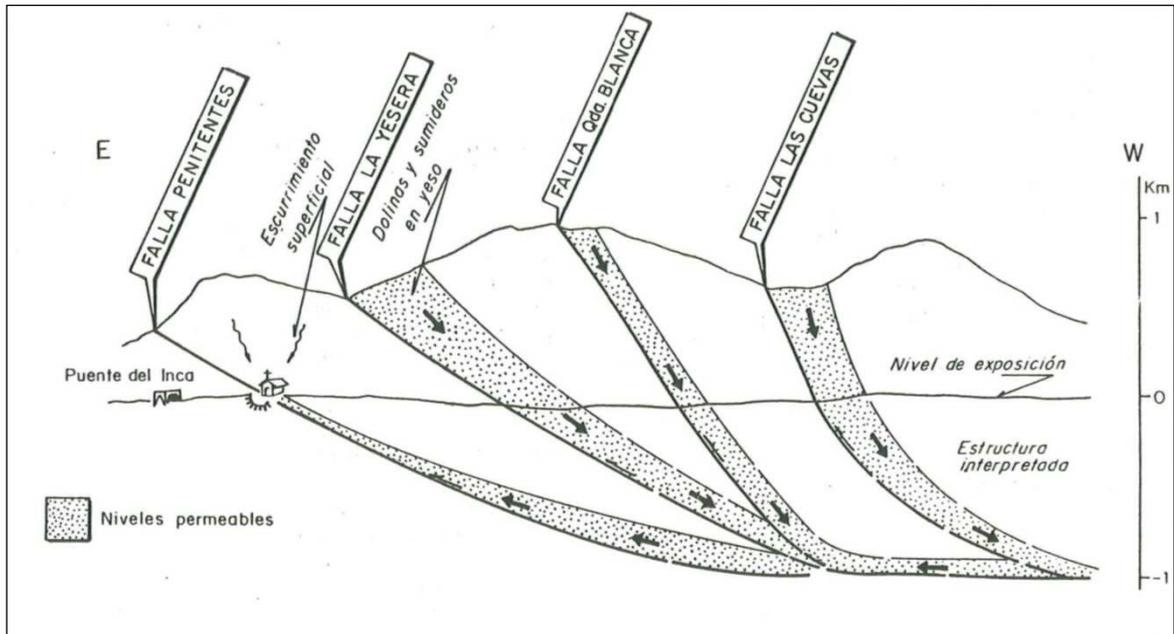


Abbildung 54. Skizze aus RAMOS (1993), die die mögliche Herkunft der Thermalquelle von Puente del Inca zeigt.

Von einem moderneren Blickpunkt aus, ergeben sich nun diese zwei sehr verschiedenen Möglichkeiten der Entstehung und Herkunft der Wässer, welche darüber hinaus auch miteinander kombiniert werden könnten.

Isotopenuntersuchungen

Die Resultate der Isotopenuntersuchungen (Sauerstoff-18, Deuterium, Tritium, Schwefel-34, Strontium-87 und Sauerstoff-18 am Sulfat-Ion) der Wasserproben von Puente del Inca sowie einer „Referenzprobe“, die am 08. August 2008 gezogen wurden, sind in Tabelle 07 dargestellt.

Sauerstoff-18 zeigt Werte zwischen -18,98 und -18,24 ‰. Diese Ergebnisse stimmen überein mit einer mittleren Höhe des Einzugsgebietes zwischen – je nach Bezug auf Vergleichswerte – 4.400 bis 5.200 m (Quelle 16 von Puente del Inca) sowie 4.500 bis 5.500 m (Quelle 17). Die Resultate decken sich auch sehr gut mit den Werten des Río Mendoza, von -19,2 ‰ (VOGEL et al., 1975) bzw. zwischen -19,1 (04.05.1987) und -16,2 ‰ (20.12.1988) (PANARELLO et al., 1993), aber wenig mit der Kurve aus VOGEL et al. (1975).

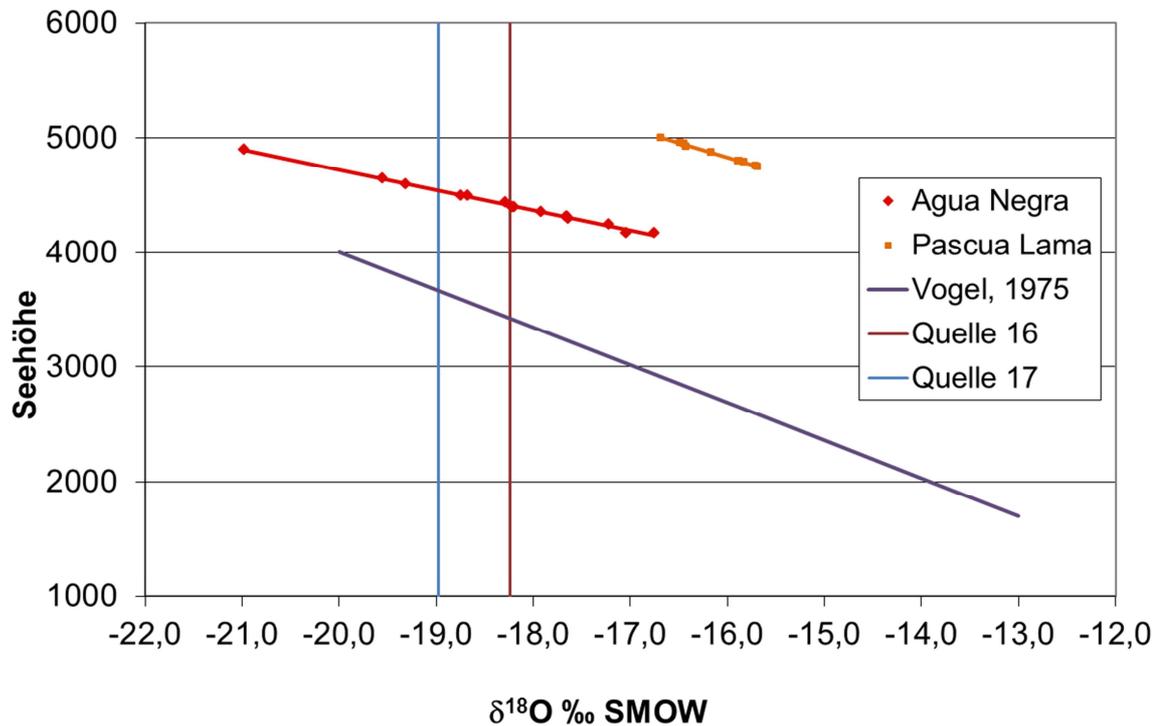


Abbildung 55. Sauerstoff 18 der Quellen 16 und 17, gegenübergestellt den Werten von Agua Negra und Pascua Lama. Die Werte zeigen, dass die Kurve von VOGEL et al. (1975) deutlich abweicht (HÖFER-ÖLLINGER & MILLEN, 2013).

Die Werte liegen sehr nah der „Global Meteoric Water Line“ (Sauerstoff 18 in Abhängigkeit von Deuterium), was zeigt, dass auch die Quellen 16 und 17 beim Corredor Bioceánico Aconcagua meteorischen Ursprungs sind.

Die Resultate von Sauerstoff-18 und Deuterium zeigen damit, dass die durchschnittliche Wassertemperatur nicht größer als 80°C gewesen sein konnte.

Die Tritiumwerte von 1,1 bis 2,7 TU legen eine Mischung der Wässer aus einem alten Anteil (> 50 Jahre, Tritiumfrei) und einem jungen Anteil (weniger als 50 Jahre) nahe. Der Tritiumgehalt aus Atomwaffenversuchen mit seinem Maximum vor etwa 50 Jahren war auf der Südhalbkugel im Vergleich zur Nordhalbkugel weniger stark relevant. Die heutigen Werte sind mit ca. 6 bis 7 TU weltweit homogenisiert – so liegt der Wert des Flusses San Juan bei durchschnittlich 7,1 TU (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2009).

Wässer, die älter als 50 Jahre sind, beinhalten dieses Isotop nicht. Daher sind die Wässer der Quelle bei Puente del Inca, die zwar größtenteils älter als 50 Jahre sind, eine Mischung aus älteren Wässern und Jüngeren, die einen Gesamtanteil von 10-15 % nicht überschreiten. In den Wässern der Quelle 17 gibt es ebenfalls eine Komponente von Wasser älter als 50 Jahre, dessen Anteil auf Grund höherer Gesamtritiumwerte in der Probe als bei Puente del Inca, auf bis zu 50 % geschätzt wird.

Bezogen auf die Werte von Schwefel 34, zeigen diese eine Herkunft von mesozoischen Evaporiten (Abbildung 56). Abbildung 57 gibt einen Überblick der vermuteten Herkunft des Sr- und SO_4 -Anteils der Quellen 16 und 17, abgeleitet aus dem Verhältnis $\delta^{34}\text{S}$ mit dem $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnis. $\delta^{34}\text{S}$ -Werte $>+10$ ‰ VCDT sind auf Lösungen mariner (evaporitischer) Sulfate zurückzuführen, wobei Wässer mit Werten $<+10$ ‰ VCDT einen zusätzli-

chen sulfidischen Einfluss zeigen, was hier nicht der Fall ist. Atmosphärische und reduzierende biogene Einflüsse werden ebenfalls als untergeordnet eingestuft.

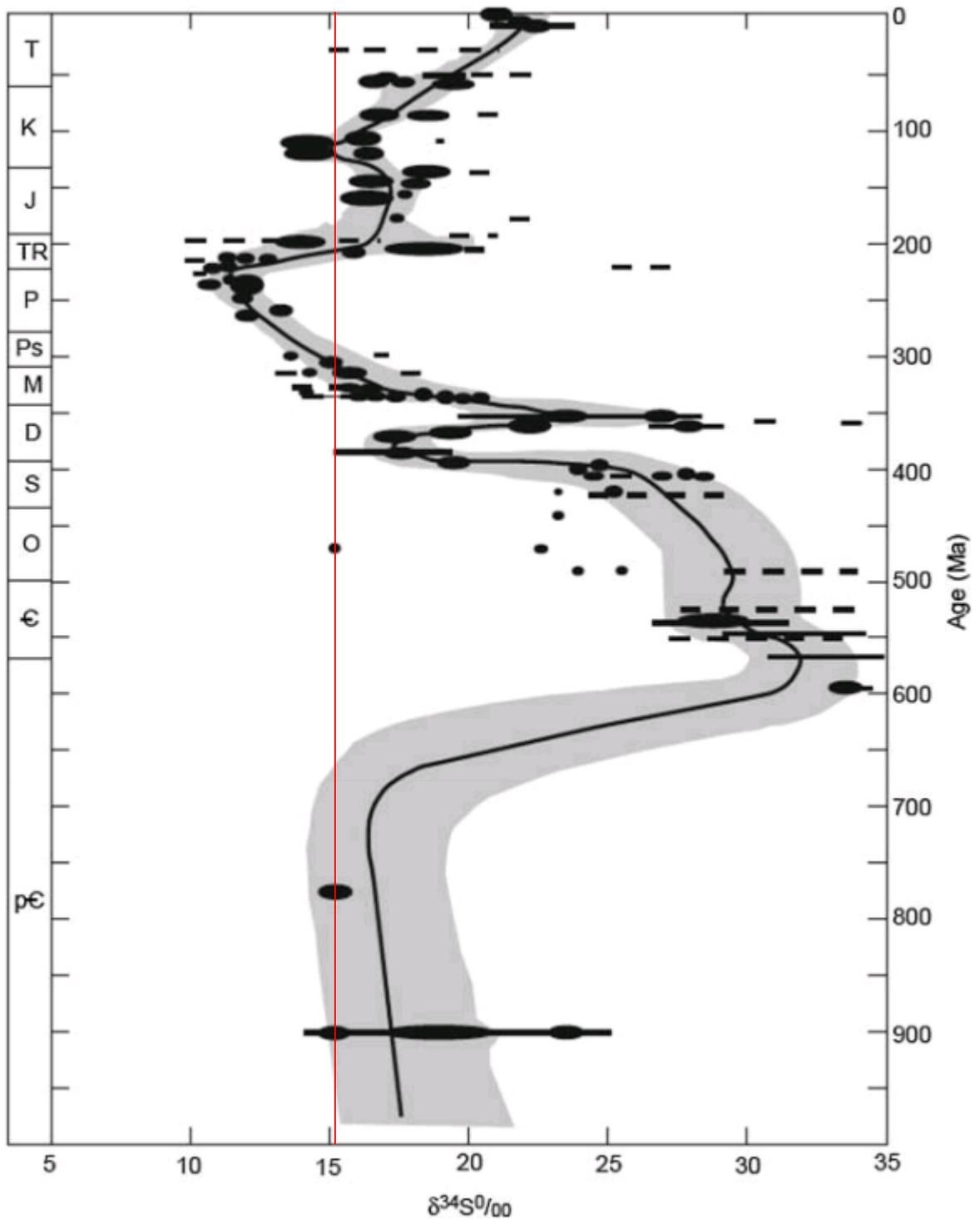


Abbildung 56. Schwefel 34: Weltweite Abhängigkeit des Schwefel-34 Isotopengehalts zum Zeitpunkt der Ablagerung der sulfatischen Sedimente, aus PAYTAN et al. (2011). Die Werte der Quellen 16 und 18 sind mit der roten Linie dargestellt.

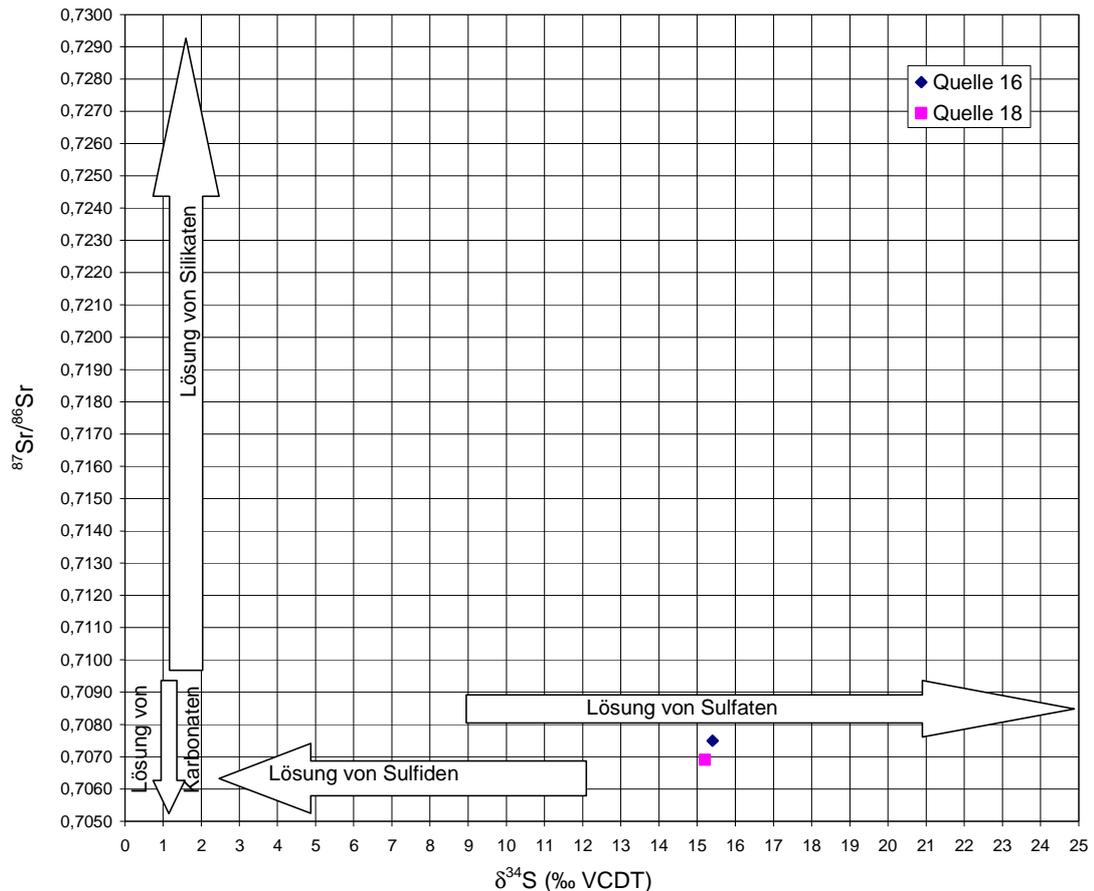


Abbildung 57. Zusammenhang zwischen den Isotopen $\delta^{34}\text{S}$ (‰ VCDT) sowie $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ unter Berücksichtigung der zwei beprobten Quellen. Es dürfte sich zweifellos um Lösung von mariner Sedimentgesteine evaporitischer oder chemischer Herkunft zu handeln.

Diskussion

Was das hydrogeologische Modell anbelangt, ist die wichtigste Frage für die Tunnelplanung, wie die hydrogeologischen Vorgänge direkt unterhalb der Thermalquelle beschaffen sind. Ein Antreffen des Fließsystems der Punta del Inca Quelle beim Tunnelbau ist aus mehreren Gründen unbedingt zu vermeiden:

- Die Punta del Inca einschließlich der zugehörigen Quelle ist ein argentinisches Nationalheiligtum. Die Stabilität der Naturbrücke ist mit der Quelle eng verwoben. Eine Drainage der Quelle wäre ein inakzeptabler Eingriff in die natürlichen Verhältnisse, mit dem das Projekt nicht genehmigungsfähig wäre.
- Die Versinterung von Gegenständen im Nahebereich der Quelle erfolgt mit etwa 1-2 mm / Woche. Souvenirhändler legen verschiedene Gegenstände 4 Wochen in die Quelle, um sie dann als Sinterkörper zu verkaufen. Im Falle eines Zutritts ähnlicher Wässer in Hohlraumbauwerke wären Drainageeinrichtungen innerhalb von wenigen Monaten zugesintert und unbrauchbar.
- Relativ große Wassermengen, die derzeit in Richtung Argentinien abfließen, würden nach Chile abfließen. Beide Länder verwenden faktisch den gesamten Abfluss ihrer Wässer für die Elektrizitätsgewinnung und für Bewässerungszwecke. Ein Ab-

zweig von bedeutenden Abflussmengen wäre ein schwer lösbares Problem für die Beurteilung der Umweltverträglichkeit des Vorhabens.

Eine weitere, wesentliche Fragestellung ist, ob in Anlehnung an das Modell von RAMOS (1993) tiefe Karsthöhlen im Gips existieren, die vom Tunnel angetroffen werden könnten.

Auf der Basis der Ergebnisse der Isotopenuntersuchungen ist das „Modell Ramos“ das besser anwendbare. Dies bedeutet, dass neben den tiefen Karsthohlräumen auch salinares Gebirge existiert (Anmerkung: RAMOS erwähnte im Gespräch, dass der hohe Chloridgehalt aus den Vulkaniten herrühren könnte.).

Die Herkunft der Wässer ist damit nicht mit Sicherheit geklärt. Es ist bekannt, dass

- eine Herkunft aus postvulkanischer hydrothermaler Tätigkeit eine untergeordnete Rolle spielt,
- das Einzugsgebiet zwischen 4.400 und 5.200 m liegen dürfte,
- das Alter des Wassers ein Mischalter von Wässern älter 50 Jahre und einem kleinen Anteil junger Wässer darstellt,
- die Mineralisierung großteils aus Lösung mariner Karbonate und Evaporite herzu-leiten ist,
- das Chlorid/Bromid-Verhältnis auf Lösung mariner Halite hinweist.

Auch die lokale Herkunft könnte dem „Modell Ramos“ entsprechen. Im unmittelbaren Einzugsgebiet gibt es keine Erhebungen höher als 4.400 m, sehr wohl aber im Bereich der südlichen Gipsdiapire nördlich der Nordflanken des Cerro Tres Gemelos. Dabei wird vorausgesetzt, dass Oberflächen-Schmelzwasser (Río Navarro) über die Systeme Porengrundwasser – Hohlräume im Karst – Hohlräume im Kluftvolumen versickert.

Andere Modellvorstellungen sind ebenfalls denkbar: Eine teilweise Versickerung der Vorfluter des Río Horcones oder des Río Las Cuevas würde ähnliche Isotopenverhältnisse für Sauerstoff und Deuterium erbringen. Eine Lösung der Sedimente würde jedenfalls erst in großer Tiefe – unterstützt durch hohe Temperaturen – stattfinden.

Ein weiteres Szenario, ein Zusammenhang zur Formation Agua de la Piedra, wird zwar in Fachgesprächen abgelehnt, eine schlüssige Begründung für den kategorischen Ausschluss konnte bislang noch niemand liefern. Abbildung 40 zeigt einen schematischen Schnitt durch den thin skinned Aconcagua Fold Thrust Belt. Die känozoischen Ablagerungen der Formation Agua de la Piedra sind hierbei ebenfalls vom Faltenbau erfasst und reichen mehrere Kilometer unter die – von Osten gesehen – ersten allochthonen Decken.

Die Formation Agua de la Piedra ist aus Konglomeraten zusammengesetzt, in denen Wässer an der Oberfläche ungehindert versickern können. Es ist sogar davon auszugehen, dass die Hochbene südlich und östlich des Aconcagua mit einer Höhe von etwa 5.000 m großteils unterirdisch entwässert. Durch den Deckenbau kann dieses Wasser nicht mehr – quer zu den teils als Stauer wirksamen Gesteinsschichten – an die Oberfläche austreten. Es gelangt somit entlang der basalen Überschiebungsbahn von Norden zur Ost-West verlaufenden Störung, die das Cuevas Tal prägt. Aufgrund geomorphologischer Prozesse sind die obersten Zehnermeter des Las Cuevas Tales versiegelt. Das Grund-

wasser musste sich irgendwo in den Tiefen des Tales seinen Weg nach oben suchen und tritt heute eher zufällig an dieser Stelle aus.

Ein weiteres Szenario ist eine Zirkulation der Wässer entlang der basalen Überschiebungsbahn, diffus oder in definierten Kanälen.

Zutrittsprognosen

Grundlagen dieser Arbeit sind zwei von einander unabhängig erstellte Zutrittsprognosen: BÖFER et al. (2008) und SCHOTTE (2011). Direkte Erkundungsarbeiten wurden im Rahmen des Tunnelprojekts noch nicht durchgeführt. Damit kann weder auf ein gesichertes geologisches Modell, noch auf Ergebnisse längerer Quellmessungen oder von hydraulischen Bohrlochversuchen zurückgegriffen werden.

Aus derzeitiger Sicht erscheint eine Betrachtung der Wasserbilanz mit vollkommener Absenkung als genauester Ansatz. Um das beeinflusste Einzugsgebiet festzulegen, wären prinzipiell der Absenktrichter und ein genaues Modell der Grundwasseroberfläche notwendig. Die Form des Absenktrichters hängt von der Lithologie ab, ein Grundwassermodell kann z.Zt. nur geschätzt werden. Bei einer maximalen Einflussbreite von z.B. 2 km, einer Tunnellänge von 52 km und einer Grundwasserneubildungsrate von 0,5 l/s/km² ist daher stationär von einem Abfluss von 52 l/s auszugehen. Dies setzt voraus, dass das Einzugsgebiet durch die N-S-streichenden Strukturen, die orthogonal durchörtert werden, nicht wesentlich erweitert wird. Eine solche Erweiterung könnte über

- verkarsteten Kalk,
- verkarsteten Gips,
- eingeschuppte Konglomerate oder geklüftete Sandsteine mit hohem Porenvolumen oder
- spröder Deformation von Festgestein entlang von Störungszonen

erfolgen. An solchen Stellen sind instationär Zutritte von mehreren hundert l/sec möglich. Aus bautechnischer Sicht müssen die Wasserzutritte stark gemindert werden, da ein freier Abfluss nicht hingenommen werden kann. Deshalb ist der Vortrieb zu unterbrechen und die Wasserdurchlässigkeit der Zone mit Injektionen zu mindern.

Die angetroffenen Wässer sind wegen ihres Sulfatgehalts und dem freien CO₂ betonagressiv. Ihr Zutritt ist daher durch Injektionen zu mindern. Die Beobachtung der Quellen an der Oberfläche zeigt Bildung von Travertinterrassen um die Austritte. Ein unterirdischer Quellaustritt vergleichbarer Wässer würde sofort zu starker Versinterung von Drainageanlagen führen.

5.4 Geothermie

Regionale Geothermie

Für die regionale Geothermie sind die Angaben in der Literatur unterschiedlich. Für den Agua Negra Tunnel, etwa 400 km nördlich des Corredor Bioceánico Central, konnten durch Ermittlung der thermischen Leitfähigkeit der Gesteine und des thermischen Gradienten aus Bohrungen Prognoserechnungen erstellt werden (HÖFER-ÖLLINGER & MILLEN, 2010). Deshalb ist dort von einem terrestrischen Wärmefluss von 100 mW auszugehen.

Ähnliche Werte, allerdings etwa 10 Breitengrade weiter im Norden, postulieren SPRINGER & FÖRSTER (1998).

UYEDA (1982, Abbildung 04) zeigt Werte von 1,45, 1,50 und 1,88 UF in unmittelbarer Nähe des Untersuchungsgebietes. Dabei entspricht 1 UF einem Wärmefluss von 66 mW. Die daraus ermittelten Werte für den Wärmefluss zwischen 96 und 124 mW streuen um einen Mittelwert, der knapp über 100 mW beträgt und mit den erkundeten Werten vom Agua Negra Tunnel übereinstimmt.

Die Senke des Wärmeflusses ist in den hochandinen Regionen im Permafrost gelegen, im Bereich des Talbodens des Las Cuevas Tales hingegen deutlich im positiven Temperaturbereich. Berechnungen, wie sie in Abbildung 58 dargestellt sind, gehen vereinfacht von null Grad Celsius an der Erdoberfläche aus.

Geothermometrie anhand der Puente del Inca Quelle

Wässer, die in geothermalen Reservoirs in großer Tiefe zirkulieren, besitzen im Allgemeinen einen gewissen Natrium-Chlorid-Gehalt. Der pH-Wert dieser Wässer ist fast neutral für den Temperaturbereich, in dem sich das Wasser befindet. Stark chlorhaltige Wässer enthalten auch eine hohe Menge an Kalzium (MARINI, 2000). Die Quelle von Puente del Inca, mit ihrem Chemismus-Typ von Na-Ca-Cl stimmt mit diesen Kriterien überein.

Die maximale unterirdische Temperatur, der die geothermalen Wässer ausgesetzt wurden, kann durch das ionische Verhältnis der Lösungen und/oder des SiO₂-Gehalts bestimmt werden.

Geothermale Wässer können in zwei Gruppen unterteilt werden:

- Jene, deren Lösungsfähigkeit von Mineralen auf der Temperatur basiert, z.B. die Geothermometer des Siliziums.
- Jene, die auf Reaktionen des Ionenaustausches basieren, die wiederum temperaturabhängig sind. Dazu sind mindestens zwei Mineralphasen notwendig.

Die Anwendung von mehr als einer geothermometrischen oder geothermischen Gleichung bringt meist Abweichungen in den Resultaten. So sind auch die Resultate der Wässer von Puente del Inca divergent – siehe Tabelle 08 und Tabelle 09:

Tabelle 08 Geothermometer des Siliziums, nach MARINI 2000.

Geothermometer des Siliziums (FOURNIER 1985)	Temp °C
Quarz (ohne Dampfverlust)	37,8
Quarz (mit maximalem Dampfverlust)	45,9
Calzedon	5,0
Amorphes Silizium	-66,6

Tabelle 09 Auf Ionen basierende geothermometrische Lösungen nach MARINI 2000.

Ionenbasierte Geothermometer	Temp °C
Na/K (FOURNIER 1979)	152,4
Na/K-Ca/Na (FOURNIER & TRUESDELL 1973)	155,9
Mg/Li (KHARAKA & MARINER 1987)	119,1
K/Mg (GIGGENBACH 1988)	118,8
Na/K (GIGGENBACH et al. 1983 sowie GIGGENBACH 1988)	171,4

Im Besonderen zeigen die Gleichungen der Silizium-Thermometer einen niedrigen Wert, der auf den ersten Blick wenig glaubwürdig erscheint. Generell scheint die Konzentration von SiO_2 mit 9,95 ppm in der Quelle von Puente del Inca für eine Thermalquelle sehr gering zu sein.

Die durchgeführten Isotopenuntersuchen (Tabelle 07) widersprechen den Ergebnissen der ionenbasierten Geothermometer definitiv. Demnach entspricht das Thermalwasser einem normalen meteorischen Ursprung mit durchschnittlichen Fließzeiten von mehreren Jahrzehnten. Gemäß des Gehalts an stabilen Isotopen hätte keine der in Tabelle 09 dargestellten Temperaturen erreicht werden können. Anhand der Isotopen der Wasserinhaltsstoffe, die durchwegs mit Lösung mariner Sedimente des mutmaßlichen Einzugsgebietes erklärbar sind, kann auch ein postvulkanischer Ursprung ausgeschlossen werden.

Seit Temperaturen jenseits des Siedepunkts als auch eine vulkanische Herkunft ausgeschlossen sind, wird die Thermalquelle mit weniger Besorgnis gesehen (HÖFER-ÖLLINGER & MILLEN, 2010):

- Der Austritt eines 36 °C heißen Wassers mit Schüttungen von knapp 100 l/s stellt eine – durchaus willkommene – kontinuierliche Abfuhr von Wärme aus dem System dar.
- Für den Fall, dass seitliches Grundwasser dem Quellwassers zuströmt, könnte im Bereich der Quelle sogar ein lokal begrenzter inverser geothermischer Gradient vorliegen.

Geothermisches Modell

Für genaue Berechnungen, wie sie für ein Geothermiemodell erforderlich sind, liegen noch zu wenig Daten vor. Eine grobe Abschätzung anhand des geothermischen Gradienten einerseits und des regionalen Wärmeflusses in Kombination mit der Wärmeleitfähigkeit der Gesteine andererseits lassen maximale Temperaturen im Tunnelvortrieb von 50 bis 70 °C vermuten (HÖFER-ÖLLINGER & MILLEN, 2010) Bei dieser Prognose sind die Einflussfaktoren (vgl. Anhang 12) berücksichtigt.

Eine vereinfachte numerische Modellierung für den Abschnitt des Deckenstapels der jurassischen Sedimente zeigt Abbildung 58. Dabei wurden drei schräg im Gebirgsverband steckende Gipsdiapiere mit entsprechend geringerer thermischer Leitfähigkeit berücksich-

tigt. Diese verursachen eine Schwankung der Geothermie entlang der Trasse zwischen 50 und 70 °C. Dabei wurde der advective Wärmetransport unberücksichtigt gelassen.

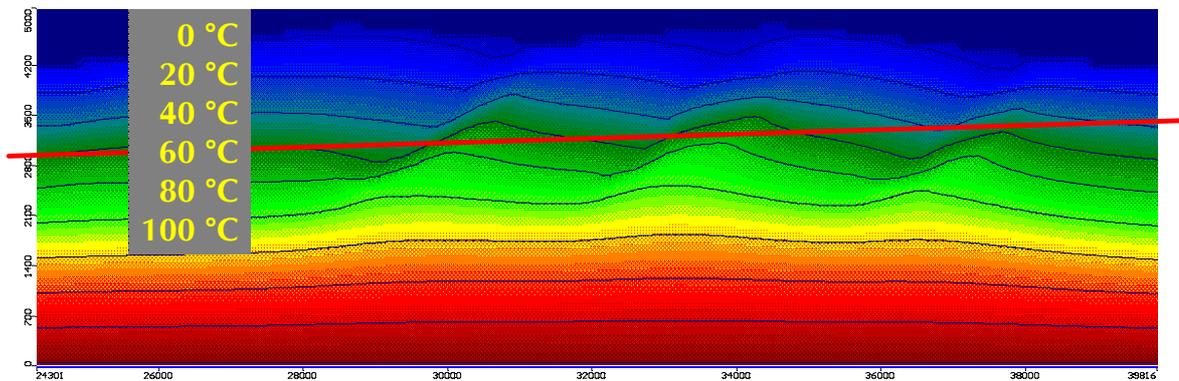


Abbildung 58. Einfache numerische Modellierung des geothermischen Wärmeflusses unter Annahme von drei Gipsdiapieren, die mittelsteil nach West fallen, für den zentralen Abschnitt der Alternative 5. Das Oberflächenrelief wurde berücksichtigt, die Senke (Erdoberfläche) mit 0 beziffert, das geplante Tunnelvorhaben mit der roten Linie gekennzeichnet (HÖFER-ÖLLINGER, 2010).

5.5 Trassenvarianten des Tunnels

In einer ersten Herangehensweise wurden 14 Alternativen erstellt, die im Bereich des Basis-tunnels Tunnellängen zwischen 32 und knapp 70 km aufweisen (BÖFER, 2008). Aus diesen Alternativen wurden No. 5, 8 und 10 weiter verfolgt (Abbildung 44).

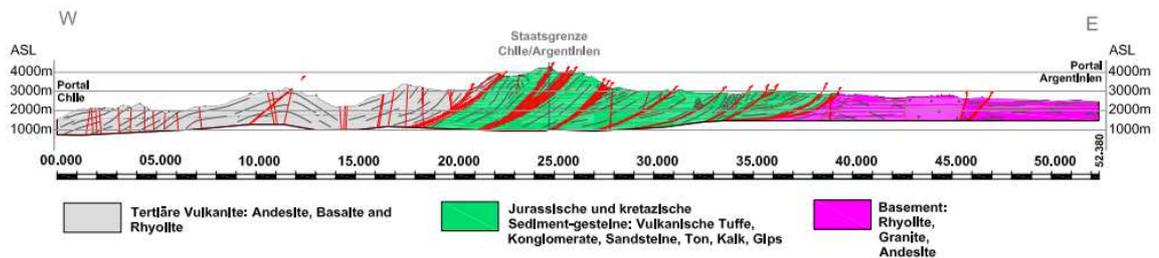


Abbildung 59. Stark vereinfachter geologischer Schnitt der Alternative 5 des Corredor Bioceánico Aconcagua. Die in violett dargestellten Abfolgen halten sich farblich an die Formation Choiyoi, beinhalten in dieser Abbildung auch die Fomeration Alto Tupungato und die Granite. In grün gehalten, die komplette jurassisch-kretazische Abfolge.

Alternative 5

Bei der Alternative 5 liegt das chilenische Portal bei Río Blanco auf einer Höhe von 1544 m. Das argentinische Portal liegt bei Punta de Vacas auf 2435 m. Die Tunnellänge beträgt 52,4 km mit einer Längsneigung von 18,5 ‰.

Entlang dieser Strecke sind zwei Multifunktionsstellen vorgesehen, die bautechnisch mit wesentlich größeren Querschnitten verbunden sind. Die erste liegt im Bereich der Station Juncal zwischen 14,5 und 15,5 km und die zweite unter der Station Las Leñas zwischen 31,0 und 32,0 km. Diese Stationierung versucht, vorteilhafte geologische Bedingungen zu berücksichtigen, soweit dies das derzeitige geologische Modell zulässt (Abbildung 60, aus: BÖFER, 2008). Eine mögliche Verlegung auf die linke Talseite des Las Cuevas Tales ist mit dieser Trassierung noch nicht erfolgt.

Die aus geologischer und hydrogeologischer Sicht anspruchvollste Zone zwischen dem Cristo Redentor Pass und Horcones wird von Alternative 5 in seiner gesamten Breite durchfahren.

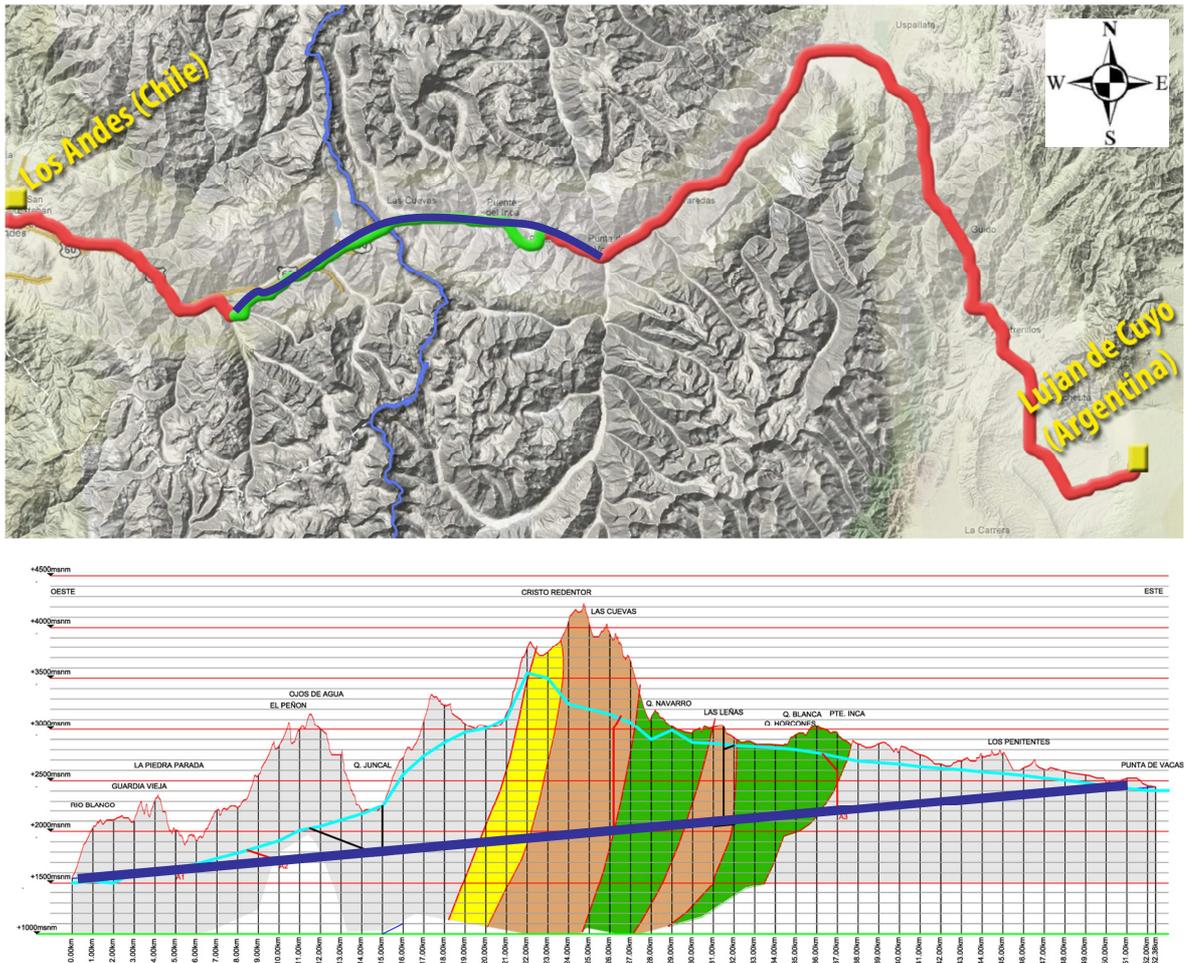


Abbildung 60. Plan und Profil der Alternative 5 des Basistunnels des Corredor Bioceánico Aconcagua (BÖFER, 2008).

Alternative 8

Das chilenische Portal der Alternative 8 liegt ebenfalls bei Río Blanco auf 1544 m. Das argentinische Portal liegt bei Penitentes auf 2610 m. Damit erreicht man eine Länge von 43,4 km und eine maximale Längsneigung von 24,4 ‰ (Abbildung 61).

Entlang der Trasse liegen zwei Multifunktionsstellen. Wie bei Alternative 5 liegt die erste davon im Bereich der Station Juncal zwischen 14,5 und 15,5 km und die zweite unter der Station Las Leñas zwischen 31,0 und 32,0 km (BÖFER, 2008).

Auch die Alternative 8 durchfährt die aus geologischer und hydrogeologischer Sicht anspruchvollste Zone zwischen dem Cristo Redentor Pass und Horcones, wenn auch mit einer etwas geringeren Überlagerung als Alternative 5.

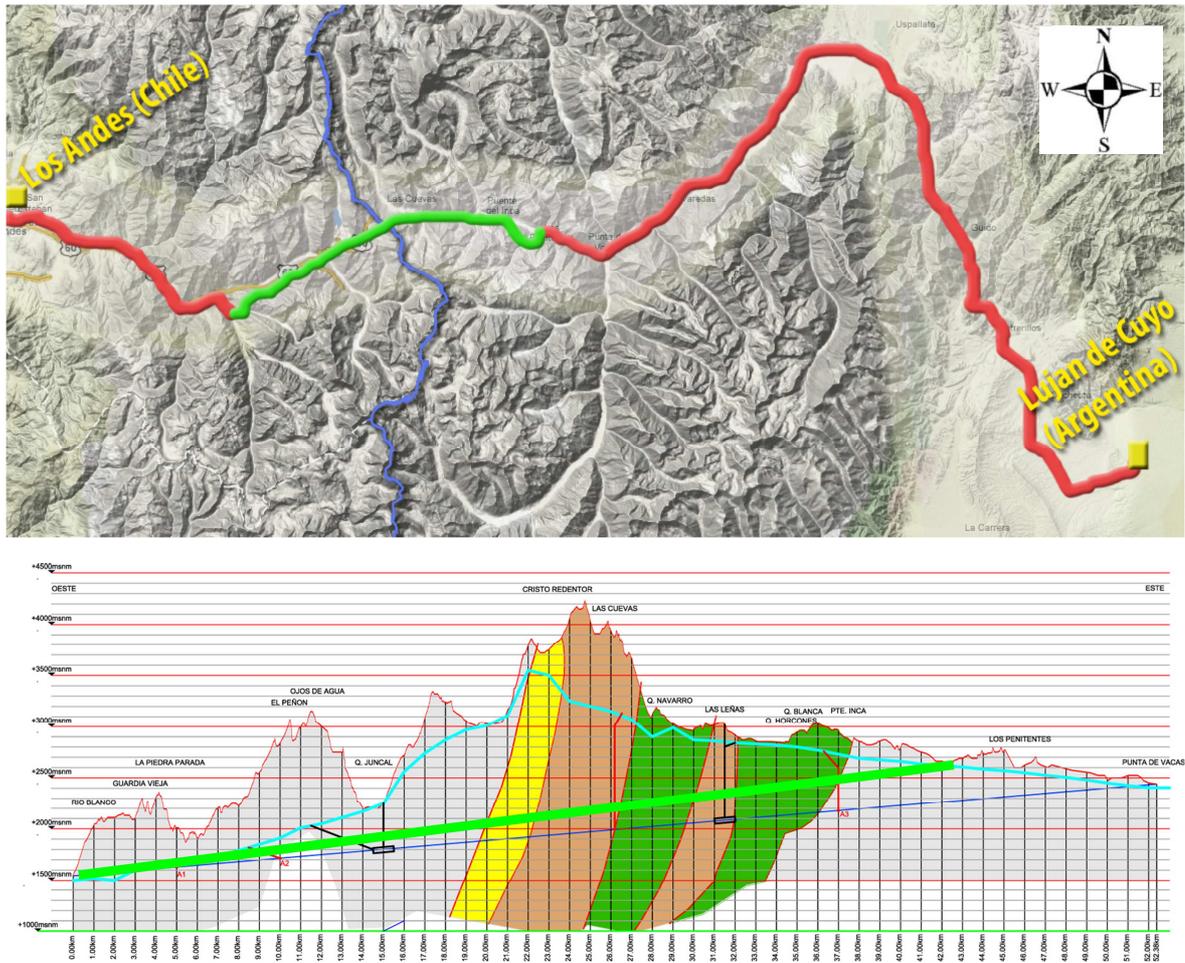


Abbildung 61. Plan und Profil der Alternative 8 des Basistunnels des Corredor Bioceánico Aconcagua (BÖFER, 2008).

Alternative 10

Abgesehen von einem Basistunnel enthält die Alternative 10 auch Abschnitte mit freier Strecke und zwei unterirdische Schleifen. Der Basistunnel hat sein chilenisches Portal bei Juncal Alto auf einer Höhe von 2388 m. Das argentinische Portal befindet sich in der Quebrada Navarro auf einer Höhe von 2920 m. Damit ergibt sich eine Länge von 18,7 km und eine Längsneigung von 30,0 ‰ (Abbildung 62).

Entlang der Trasse ist eine Multifunktionsstelle vorgesehen, im Bereich der Station Caracoles zwischen 10,0 und 11,0 km der Trasse (BÖFER, 2008).

Mit der Alternative 10 lässt sich der Großteil der geotechnisch anspruchsvollen Zone des jurassischen Deckenstapels vermeiden. Lediglich im unmittelbaren Portalbereich der Quebrada Navarro in Argentinien liegen verfaltete Gesteine der Formation Vaca Muerta und Gips vor.

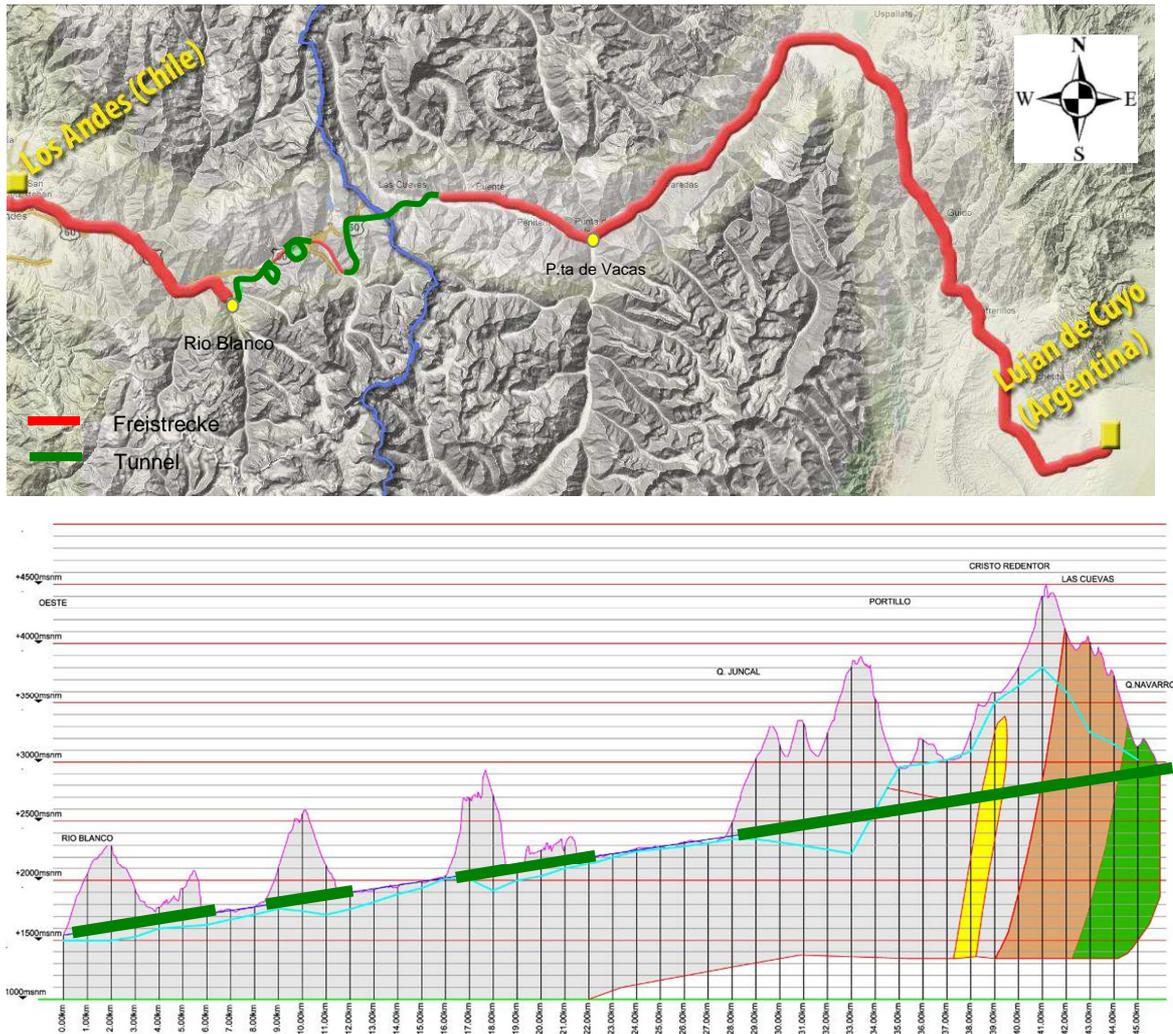


Abbildung 62. Plan und Profil der Alternative 10 des Basistunnels des Corredor Bioceánico Aconcagua (BÖFER, 2008).

Trassierung aus geologisch-hydrogeologischer Sicht

Aus geologischer Sicht werden bei der Trassierung folgende Formationen und Besonderheiten angetroffen:

- Formation Cristo Redentor, Rote Sandsteine in Wechsellagerung mit Tonstein und Gips (in großer Tiefe: Anhydrit). Diese Abfolgen sind bei hoher Überlagerung zu meiden, da das Gebirge nicht ausreichend schnell gestützt werden kann, bevor es sich nach dem Ausbruch plastifiziert und starken Deformationen unterliegt.
- Formation Auquilco, Gips. Diese Formation ist in jedem Fall zu durchfahren. Bei der Trassenwahl ist zu beachten, dass dies bei möglichst geringen oder möglichst hohen Überlagerungshöhen passiert. In größerer Tiefe ist zu erwarten, dass das Gebirge nicht als Gips, sondern als Anhydrit vorliegt.
- Alle weiteren Formationen der Jura-Kreide-Sequenz zeigen Einschaltungen von Aschelagen und Tonstein. Diese Gesteine neigen bei Druckentlastung und Wasserzutritt zu Expansion, wobei dies sowohl physikalisch (Wasseraufnahme) als auch chemisch (Ionenaustausch) begründet sein kann.

- Querung hochandiner Täler. Je nach Trassierung sind Haupt- und Nebentäler unterirdisch zu queren. Vorstellungen zu Talfüllungen in großen Tiefen liegen lediglich aus Rückschlüssen von den oberflächennahen Prozessen vor. Diese zeigen, dass mit Einschaltungen von Lockergesteinen aller Kornfraktionen und Sortierungen zu rechnen ist.

Aus hydrogeologischer Sicht sind bei der Trassenwahl die nachfolgenden Aspekte zu berücksichtigen:

- System der Puente del Inca Quelle,
- Karst im Gips,
- Evtl. Karst in den Karbonatgesteinen,
- Konglomerate der Formation Agua de la Piedra,
- Doppelporosität der Sandsteine der verschiedenen Formationen,
- Hydrogeologie der Störungszonen,
- Hydrogeologie der quartären Talfüllungen.

Aus derzeitiger Sicht ist das geologisch-hydrogeologische Modell noch zu unscharf, um eine konkrete Trassenvariante zu bevorzugen. Es sind lediglich die möglichen Problemgebiete bekannt, aber noch nicht deren jeweilige exakte räumliche Ausdehnung.

Aus diesem Grund wurde während der bisherigen Bearbeitung die Alternative 5 noch nicht auf die Nordseite des Las Cuevas Tales verlegt: Es sprechen Indizien dafür, dass die Verhältnisse dort besser werden, eine definitive Entscheidung kann aber erst in Folge von Bohrerkundungen in diesem Raum getroffen werden.

6 DISKUSSION

6.1 Geologisch-hydrogeologische Einflussfaktoren bei der Trassenfindung

Bei zwei geplanten Tunnelprojekten in den Anden (Corredor Bioceanico Aconcagua und Agua Negra Tunnel) wurden in verschiedenen Projektphasen systematisch europäische Standards hinsichtlich der geologischen Bearbeitung gesetzt:

- Es erfolgten umfangreiche geologische Kartierungen in verschiedenen Maßstäben.
- Es erfolgte eine konsequente Abwicklung der geomechanischen Planung auf dem Niveau der jeweiligen Projektphase.
- Es wurden hydrogeologische Kartierungen durchgeführt, die durch Probenahmen und Laboranalytik ergänzt wurden.
- Es wurden umfangreiche Erkundungsprogramme erstellt und teilweise bereits umgesetzt.

Die ergriffenen Maßnahmen sind notwendig, um Bauwerke erstellen zu können, die in ihrer Komplexität den großen europäischen Alpentunneln (Gotthardbasistunnel, Lötschberg-tunnel, Brennerbasistunnel, Koralm-tunnel, Semmeringbasistunnel, Basistunnel der Eisenbahnverbindung Lyon-Turin-Ferroviale) vergleichbar sind.

Diese Komplexität hat verschiedene Facetten. Beim Agua Negra Tunnel wird es viele Probleme, die bei den zwei südlichen Vorhaben (Corredor Bioceanico Aconcagua, Las Leñas) zu erwarten sind, nicht geben. Ab dem 31. Breitengrad beginnt das in Kapitel 5.2 beschriebene marine Becken mit seiner jurassischen und kretazischen Entwicklung. Dieses Becken besaß ursprünglich eine Breite von bis zu etwa 40 km und wurde tektonisch in einem Thin-Skinned-Tectonic-Mechanismus auf etwa 12 bis 15 km zusammengefoldet. Der Deckenstapel zeigt zahlreiche Aufschiebungen, die zu Schichtverdoppelungen bzw. Vervielfachungen führen. Die Aufschiebungen finden im Bereich weicher Gesteine, insbesondere Gips, statt. Der Gips stammt aus der Formation Auquilco des Malm. Durch den Verfassers wird nicht ausgeschlossen, dass manche Gipsvorkommen, z.B. die um den Vulkan Maipú, auch hydrothermal entstanden sein können. Isotopen an gelösten Sulfationen zeigen aber zumindest im Gebiet des Corredor Bioceánico Aconcagua Signaturen mariner Evaporite des Jurassikums.

Das Vorkommen mächtiger Gipsfolgen hat im schlimmsten Fall Auswirkungen auf die Machbarkeit der Alternative 5 des Corredor Bioceánico Aconcagua. In der Literatur finden sich keine Angaben, bis zu welcher Tiefe Gips stabil bleibt, aber es ist durchaus davon auszugehen, dass auch in 1 km Tiefe noch Gips auftreten kann. Dieser hätte dann auch ein geringeres Porenvolumen und damit höhere einachsiale Druckfestigkeiten. Tatsächlich ist dies Spekulation: Die Frage, ob man in 1 km Tiefe im Gips noch Hohlräume anlegen kann, ist ungeklärt, wenngleich GIAMBASTIANI (2005) diesen Fragenkomplex anreißt. Der Hohlraum kann sinnvoller Weise nur dann gebaut werden, wenn zwischen dem Aushub und der Deformation des Gesteins ausreichend Zeit bleibt, um Beton zum kraftschlüssigen Abbinden zu bringen.

Dasselbe gilt für die subhorizontalen Scherhorizonte der Aufschiebungen. Es liegt eine sehr ungünstige Spannungssituation vor: Das sehr flache Einfallen der Scherbahn verursacht, dass die volle Auflast des Gebirges im Hangenden auf das zerlegte Material der Scherbahn einwirkt. Über die geologische Zusammensetzung und das Verhalten dieser Scherbahnen ist noch wenig bekannt.

Ein größeres Problem könnten die Lutite und zerscherten Sandsteine der Formation Cristo Redentor darstellen, die stark von Gips und Anhydrit durchsetzt sind. Sie stehen an der Oberfläche im Bereich der größten Überlagerung des Tunnels an. Sie bilden dort eine Antikline und bereiteten bereits beim Bau des Scheiteltunnels größere Probleme (BARCLAY, 1910). Der weitere Verlauf dieser Schichten in größerer Tiefe unter der Falte ist unbekannt. Im schwierigsten Fall sind diese Sedimente über mehr als einen Kilometer Länge zu durchhörtern. Dies könnte in Kombination von Überlagerungshöhen von 1,5 bis 2,2 km zur Nicht-Machbarkeit der Alternative 5 führen. Auch hier würden die Abbindezeiten von Beton nicht ausreichen, um die Deformationen abzufangen.

Zudem liegen noch zwei wesentliche ungeklärte hydrogeologische Fragestellungen vor: Die Herkunft der Thermalwässer der Puente del Inca Quelle ist unbekannt. Mittels Quellkartierungen und Isotopenuntersuchungen konnten zwar postvulkanische hydrothermale Aktivitäten und hochtemperierte Systeme ausgeschlossen werden (HÖFER-ÖLLINGER & MILLEN, 2010). Aber die Quellwässer dürfen aus Umweltschutzgründen nicht drainiert und abgeführt werden. Die geplante Alternative 5 unterquert die Puente del Inca Quelle in einer Tiefe von knapp 700 m. Im Rahmen von Quellenkartierungen auf dieser Trasse wurde festgestellt, dass Natrium und Chlorid lediglich südlich des Las Cuevas Tales gelöst sind. Weitere Untersuchungen werden folgen. Wenn das geplante Untersuchungsprogramm die These bestätigt, dass die zwei Talseiten hydrogeologisch von einander getrennt sind, könnte man an der nördlichen Talflanke einen ungewollten Kontakt zur Puente del Inca Quelle meiden.

Die zweite hydrogeologische Frage bezieht sich auf das hydrogeologische Modell von RAMOS (1993), über das einerseits Zweifel bestehen, das andererseits jedoch noch nicht plausibel widerlegt wurde. Dabei stellen sich die Fragen, ob die Dolinen der Gipsdiapire der Las Leñas und Navarro Störungen tatsächlich im Einzugsgebiet der Puente del Inca Quelle liegen, und in weiterer Konsequenz, wie man sich diese Karsthohlräume vorzustellen hat. Wenn sie von den Tunnelbauarbeiten angetroffen werden, sind hohe Wasserdrücke und -mengen zu erwarten. Das Wasser der Puente del Inca Quelle steigt stark gaspannt artesisch auf, aber über das System der kommunizierenden Gefäße könnte das gesamte hydrogeologische Regime rasch umgedreht werden, wie es im Apennin-Basistunnel zwischen Florenz und Bologna der Fall ist (GARGINI et al., 2008) – dort mit fatalen Folgen für die Umwelt.

Auch die alternative Interpretation, dass nicht die Gipsdiapire, sondern die Konglomerate der Formation Agua de la Piedra die Herkunft des Thermalwassers darstellen, könnte das Vorhaben gefährden. Dies wäre dann der Fall, wenn diese diskordant auf dem entstehenden Deckenstapel abgelagerte und mehrfach eingeschuppte Formation bis auf das Tunnelniveau hinabreicht. Für diesen Fall wäre die Machbarkeit der Alternative 5 in Frage zu stellen.

Die Alternative 10 hat ihr argentinisches Portal im Bereich der Quebrada Navarro. Sie hat den Nachteil, dass der Fahrbetrieb im geplanten Tunnel eingeschränkt werden müsste. Bei einer Streckengradiente von 3,0 % müssen Tonnagen, Geschwindigkeiten und Zug-

längen stark eingeschränkt werden. Eine geplante Verkehrsleistung von 70 Millionen t/a wäre dann kaum zu verwirklichen.

Es versteht sich daher von selbst, dass im Zuge der geplanten Erkundungskampagne zunächst die oben dargestellten Fragen gelöst werden. Eine definitive Entscheidung zwischen den Alternativen 5, 8 und 10 steht daher noch aus, wenngleich die Alternative 5 aufgrund ihrer Leistungsfähigkeit angestrebt wird.

Unsicherheiten gibt es weiterhin bei grundlegenden hydrogeologischen Fragestellungen, wie z.B. der Wasserbilanz. Im Untersuchungsgebiet besitzt der Schmelzwasserabfluss eine wesentliche Bedeutung. In Trockenperioden stammen gemäß LEIVA et al. (2007) bis zu mehr als 80 % des Abflusses des Río de Las Cuevas aus Gletscherabfluss.

Bei einer Wasserbilanz gilt grundsätzlich, dass die Grundwasserneubildung sich aus der Differenz von Niederschlag, oberirdischem Abfluss und Verdunstung errechnet. Erschwerend ist bei einer Bilanzierung zu beachten, dass der Anteil des unterirdischen Abflusses kaum etwas über die hydrogeologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet aussagt. Vereinfacht wird daher der Trockenwetterabfluss mit der Summe aller unterirdischen Abflüsse gleichgesetzt. Dieser setzt sich aber, wie erwähnt, großteils aus Schmelzwässern von Gletschern zusammensetzt.

Es ist auch möglich, Wasserbilanzen für linienförmige Elemente darzustellen, z.B. entlang von Fließsystemen, die einen Teil des flächigen Einzugsgebietes ausmachen. Am wenigsten sinnvoll ist die Wasserbilanz für einen Punkt, so wie es von BÖFER et al. (2008) und SCHOTTE (2011) dargestellt wurde. Eine Grundwasserneubildung in der Größe von 5 mm/a im Raum der Niederschlagsstation Puente del Inca ist wenig aussagekräftig. Puente del Inca ist der wichtigste Punkt einer Entlastung eines gesamten hydrogeologischen Fließsystems, dessen Ursprung unbekannt ist. Eine unter artesischem Auftrieb befindliche Quelle schüttet hier 40-60 l/s. Die Aufstellung einer Wasserbilanz für diesen Punkt ist sinnvoll entlang der linienförmigen Struktur des Fließsystems – eine Darstellung anhand der Lage von Niederschlagsstationen hingegen ist wenig zielführend.

Für die vorliegende Fragestellung ist der bereits vorhandene Flusspegel bei Punta de Vacas – nahe des geplanten argentinischen Portals – gut geeignet. Im Winter beträgt der Niedrigwasserabfluss etwa 4 bis 5 l/s/km². Geht man vereinfachend davon aus, dass etwa 90 % des Abflusses aus Schmelzwässern der Gletscher stammen, liegt der unterirdische Abfluss bei etwa 0,5 l/s/km². Diese Menge ist identisch mit dem unterirdischen Abfluss, der oberhalb des Pegels infiltriert und in Quellen oder Uferfiltrat wieder austritt.

Der Teil des Abflusses, der unterirdisch am Flusspegel vorbei fließt, bleibt bei dieser Betrachtung unberücksichtigt.

Der Pegel des Río Juncal in Chile liegt nahe der Talmündung von Juncal Alto exakt über der geplanten Tunneltrasse. Er stellt damit nicht das gesamte Einzugsgebiet auf chilenischer Seite dar. Auffällig ist hier ein größerer Unterschied zwischen dem Schmelzwasser- und dem Trockenwetterabfluss. Der Niedrigwasserabfluss beträgt im Winter etwa 4 bis 7 l/s/km². Im Einzugsgebiet des Pegels befinden sich auch hier Gletscher und Blockgletscher. Somit zeigen sich in zweierlei Hinsicht Parallelen zur argentinischen Seite: Die relative Menge des Niedrigwasserabflusses als auch dessen Anteil am unterirdischen Abfluss.

Beim Agua Negra Tunnel stellt sich die Lage aus hydrogeologischer Sicht weniger komplex dar. Die Frage der generellen Machbarkeit stellt sich nicht. Bei der unterirdischen Querung der Quebrada di San Lorenzo ist es fraglich und noch nicht geklärt, ob ein Vortrieb mittels TVM möglich ist. Ein konventioneller Vortrieb ist in jedem Fall möglich.

Für den Agua Negra Tunnel ist der Bau eines Erkundungsstollens geplant. Ein solcher Erkundungsstollen hat verschiedene Vorteile: er dient der geologischen Erkundung, ist als Zugangsstollen für Injektionsarbeiten nutzbar, dient der Baubelüftung und kann schließlich als Belüftungsstollen dienen.

Die aus der bisherigen hydrogeologischen Prognoseberechnung erhaltenen Werte halten einer kritischen Überprüfung nicht stand. Die Durchlässigkeiten erscheinen zwar als Ergebnisse aus den hydraulischen Feldversuchen plausibel, die Wasserbilanz ist jedoch nicht schlüssig.

Wendet man die Schätzwerte des Zwischenabflusses an, lassen sich Näherungswerte für die Infiltration im stationären Zustand auf lange Sicht berechnen. Unter der Annahme, dass die Grundwasser-Neubildungsrate des Gebietes, das von der Absenkung durch den Tunnel betroffen ist (konservativer Ansatz: $5 \text{ km}^2/\text{km}$ Tunnellänge), etwa $0,5 \text{ l/s/km}^2$ beträgt, ist in stationärem Zustand mit einer Infiltration von ungefähr $2,5 \text{ l/s}$ pro Tunnelkilometer zu rechnen. Für einen Tunnel von circa 14 km Länge würde diese eine stationäre Gesamteinfiltration von 35 l/s am chilenischen Portal ergeben.

Damit ergibt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den langfristig stationären Zutritten, die gemäß Abbildung 29 im Bereich um 150 bis 160 l/s liegen müssten, und einer einfachen Betrachtung der Wasserbilanz, die 35 l/s ergibt.

Es ist zu erwarten, dass durch den Eingriff in den Bergwasserhaushalt Wassermengen entnommen werden, die nicht mehr durch Infiltration neu gebildet werden. Bis diese erschöpft sind, kann der Zutritt deutlich über diesen 35 l/s liegen.

6.2 Besonderheiten tiefliegender Tunnel

Tiefliegende Tunnel werden durch das Auftreten charakteristischer Gebirgsverhaltenstypen definiert:

- Scherversagen durch Überbeanspruchung mit hohlraumnaher oder tiefreichender Plastifizierung des Gebirges
- Schichtknicken
- Bergschlag
- Kombination dieser genannten Verhaltenstypen innerhalb von kurzem Abstand, gegebenenfalls auch mit Wasserzutritt und/oder quellendem Gebirge

Aus geologischer Sicht steigt der Planungsaufwand für einen tiefliegenden Tunnel überproportional zu dem eines oberflächennahen Vorhabens.

Im Zuge des Arbeitskreises „Tiefliegende Tunnel“ der ÖSTERREICHISCHEN GESELLSCHAFT FÜR GEOMECHANIK wird seit 2010 versucht, diese Abhängigkeiten klar herauszuarbeiten und zu formulieren. Ziel ist ein Planungsleitfaden für tiefliegende Tunnel. Dieser soll sich von der bestehenden Richtlinie der ITA für lange und tiefe Tunnel (INTERNATIONAL

TUNNELLING AND UNDERGROUND SPACE ASSOCIATION, 2010) unterscheiden, indem er mehr auf die spezifischen Planungsschritte und auf Unterschiede zu den oberflächennahen Tunnelvorhaben eingeht.

Im Zuge der Erstellung des Leitfadens wurden für die Erstellung des Gebirgsmodells die nachfolgenden Besonderheiten tiefliegender Tunnel herausgearbeitet (ÖSTERREICHISCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOMECHANIK, 2012). Alle nachfolgenden Themen gelten sowohl für europäische als auch für südamerikanische Verhältnisse:

- Das Volumen des darzustellenden und relevanten Gebirgsmodells V_{Gebirge} ist bei tiefen und langen Tunnel ein Vielfaches von dem seichter Tunnel. Das durch Erkundungsmaßnahmen sondierte Volumen V_{Erkundet} ist bei tiefliegenden in Relation zu oberflächennahen Tunneln aufgrund der großen Überlagerung meist deutlich geringer.
- Der Erkundungsaufwand ist überproportional hoch, auch bei hohen Erkundungsaufwendungen verbleibt eine vergleichsweise hohe Prognoseunsicherheit.
- Eine signifikante Schärfung bzw. Präzisierung der Prognose kann durch den Vortrieb eines Erkundungsstollens auf geplantem Tunnelniveau erreicht werden.
- Projekträume – Es liegen durch geologische, hydrogeologische aber auch andere umweltrelevante Einflüsse generell extrem große Projekträume vor. Die großen Projekträume führen zu langen Bearbeitungszeiten.
- Erkundungsproblematik – Tiefe Erkundungen sind technisch schwierig und kostspielig und stoßen häufig an die Grenzen der Machbarkeit. Im Hochgebirge ist die Zugänglichkeit in räumlicher und zeitlicher Hinsicht erschwert.
- Aus geometrischen Gründen und vor allem zur Erkundung steiler Strukturen sind abgelenkte Bohrungen erforderlich. Solche abgelenkten Bohrungen sind – wenn überhaupt – nur mit hohem Kostenaufwand durchführbar.
- Bohrlochversuche sind in großer Tiefe durchzuführen. Viele standardmäßig verfügbare Geräte sind aus technischen Gründen nicht geeignet in großen Tiefen Messungen auszuführen, es sei denn erst nach genauer Abstimmung von Bohrloch- und Messinstrument-Durchmesser. Daher ist bei der Planung der Versuche schon im Vorfeld abzuklären, welche Messungen in welcher Tiefe ausführbar sind.
- Spannungsverhältnisse: Die Vereinfachung, dass das Spannungsniveau in der Tiefe der Überlagerungsmächtigkeit multipliziert mit der Gebirgsdichte entspricht ($\gamma \cdot h$), und die Horizontalspannungen um einen Faktor k geringer sind, ist meist unzulässig. Mit zunehmender Tiefe nehmen die horizontalen Gebirgsspannungen zu, da tektonische (Rest-)Spannungen an Bedeutung gewinnen. Daher können die Hauptspannungen alle Richtungen aufweisen und deutlich vom Überlagerungsdruck ($\gamma \cdot h$) abweichen.
- Dadurch bedingt tritt Gebirgsverhalten wie Gebirgsplastifizierung, Bergschlag und verstärkter Nachfall bei blockigem Gebirge häufiger auf.
- Störungen, kombiniert mit hohem Wasserdruck führen zu schwerwiegenden bautechnischen Problemen beim Tunnelvortrieb.

- In großer Tiefe ist eine Beachtung des geothermischen Gradienten notwendig (sowohl in den Alpen als auch in den Anden: ca. $2-4^{\circ}/100$ m Tiefe).
- Eine die Ausbruchsarbeiten beeinflussende Gasführung ist besonders bei tiefen Tunneln ein Thema.
- Grundwasserverhältnisse sind vor allem durch höhere Drücke gekennzeichnet. Absenkungen können zu weitreichender Beeinflussung des Bergwassers und zu großräumigen Setzungen führen.
- Grundwasserbeschaffenheit: In großer Tiefe hat das Bergwasser andere chemische und physikalische Eigenschaften (erhöhte Temperatur, reduzierende Wässer, stark mineralisierte Wässer, Gasgehalt etc.).
- Der Fortschreibung des Baugrundmodells im Zuge der Bauausführung kommt bei tiefliegenden Tunneln besondere Bedeutung zu, da das baugelogische Modell naturgemäß größeren Unschärfen im Verlauf der Planung unterliegt.

Aus hydrogeologischer Sicht gibt es bei tiefliegenden Tunnel einige Spezifika, die im Zuge der Planung berücksichtigt werden müssen:

- Gewöhnlich gilt, dass die Gesamtlänge einer Bohrung im Fall eines Pump- oder Auffüllversuchs ein Integral über alle Durchlässigkeiten des gesättigten Bereichs abbildet. Bei tiefliegenden Vorhaben zeigt es sich jedoch, dass die hydraulische Durchlässigkeit im Gebirge mit zunehmender Überlagerung abnimmt. Im Falle einer vertikalen Bohrung, die in etwa das Tunnelniveau erreicht, wäre bei sonst gleichen Bedingungen die Durchlässigkeit auf Tunnelniveau am niedrigsten. Ein Auffüll- oder Pumpversuch würde somit zu hohe Werte ergeben, wenn man diesen Umstand nicht berücksichtigt. Abhilfe schaffen hier Tests in (mittels Packer) isolierten Bohrlochabschnitten.
- Bei der hydrogeologischen Modellierung wird in jeder Hinsicht vereinfacht. Unbeachtet bleibt häufig, dass für einen gering durchlässigen Festgesteinsabschnitt, z.B. auf Tunnelniveau, die höher liegenden, stärker durchlässigen Bereiche mit meist größerem Porenvolumen, als Vorratsspeicher fungieren. Das bedeutet, dass sie bei einer Absenkung im geringer durchlässigen Bereich eine nahezu unendliche Quelle darstellen können. Es ist davon auszugehen, dass im wenig gestörten Festgestein, bei großer Tiefe, eine vielfache Abfolge stärker und weniger stark durchlässiger Folgen vorliegt. Befindet sich nun der Tunnel im Bereich einer höher durchlässigen Gesteinsfolge, so läuft diese trocken, und zwar bis zum nächsten gering durchlässigen Abschnitt. Auswirkungen auf die Oberfläche sind dann nicht zu erwarten.
- Davon völlig unabhängig sind die Störungen zu betrachten, die sowohl als Grundwasserleiter als auch als stauendes Element wirken können. In komplexen Fällen trifft beides zu: Ein quasi dichter Kern trennt einen oder zwei stärker durchlässige Zerrüttungszonen im Randbereich, bzw. es liegt eine mehrfache Abfolge von dichten und gut durchlässigen Zonen vor (Faulkner et al., 2010).
- Bei gegenüber dem Spannungsregime relativ weichem Gebirge ist die Hydromechanische Kopplung zu beachten: Der Wasserdruck wirkt stützend auf die Hohl-

räume. Bei Entwässerung neigen diese zu schließen, was Oberflächensetzungen und eine Reduktion der Durchlässigkeit des Gebirges zur Folge hat.

- Im hohlraumnahen Bereich ändern sich bei den Aushubarbeiten die hydraulischen Eigenschaften des Gebirges. Dieses im Tunnelvortrieb immer wieder beobachtbare Phänomene zeigt sowohl Erhöhungen, als Reduktion der Durchlässigkeit. Umlagerungen der Gebirgsspannung als Reaktion auf den Aushub verursachen eine Öffnung von Klüften und damit eine Erhöhung der Durchlässigkeit. Analytisch bzw. versuchstechnisch ist dies in Kelsall et al. (1984), Martino & Chandler (2004), Pusch (1989), Souley et al. (2001) und Chen et al. (2015) dargestellt. Auf den zeitlichen Verlauf dieser Ereignisse gehen MILLEN et al. (2015) ein. Auf Änderungen der Durchlässigkeit reagieren insbesondere Störungszonen, die von einer Abfolge stark durchlässiger Zonen (z.B. stark zerlegte Randzone) mit einer oder mehr weniger durchlässigen Kernzonen gekennzeichnet sind. Dadurch zeigt sich, dass Wasserzutritte häufig nach etwa 24 Stunden auftreten, manchmal nach 2-3 Tagen (MILLEN et al., 2015).
- Die hydrogeologischen Verhältnisse im Karst sind bereits bei oberflächennahen Tunnelbauvorhaben schwer zu prognostizieren. Bei tiefliegenden Tunneln hingegen handelt es sich im Falle des Auftretens von Karst um risikobehaftetes Vorgehen, da ein Antreffen von Karsterscheinungen häufig mit Wassereinbrüchen verknüpft ist. Neben Mehrkosten und Verzögerungen liegt eine potenzielle Gefährdung von Mensch und Gerät vor, die nur durch umsichtige und redundante Vorerkundung vom Tunnel aus und ein entsprechendes Sicherheitsmanagement zu beherrschen ist.

6.3 Besonderheiten bei Tunnelvorhaben in den Anden

Ergänzend zu den oben dargestellten Punkten gibt eine qualitative Darstellung in Stichworten Einblick in die Besonderheiten andiner Tunnelbauprojekte. Einige Punkte sind zwar prinzipiell aus den Alpen bekannt, erreichen in den Anden aber ungewohnte Ausmaße und bedürfen dort einer tieferen Betrachtung, als es in Europa notwendig ist.

- In-situ-Spannung. In den Anden weicht die Orientierung der Hauptspannung häufig stark von der lithostatischen Überlagerung ab, sie ist dann auch deutlich höher als der Überlagerungsdruck. Bei den Erkundungen sind jedenfalls entsprechende Versuche durchzuführen. Bei der Planung der Stützmaßnahmen eines Tunnels ist auf diese Tatsache einzugehen.
- Geothermie. Bei beiden untersuchten Basistunnelvorhaben liegt der Wärmefluss bei etwa 100 mW, bei dem noch nicht untersuchten Las Leñas Tunnelbauvorhaben wird aufgrund der Nähe zu einem aktiven Vulkan (El Sosneado, etwa 10 km südöstlich des argentinischen Portals) ebenfalls von einem hohen Wärmefluss zu rechnen sein. Bei den großen Alpentunneln liegt der Wärmefluss mit etwa 50 mW deutlich niedriger, somit hat man dort auch erst bei extrem hohen Überlagerungen (ab etwa 2 km) größere Probleme mit der Temperatur (BUSSLINGER, 1998; BUSSLINGER & RYBACH 1997).
- Existenz quellfähiger Minerale. Andesitische Tuffe, Brekzien und Laven zeigen an Schichtfugen und in Klüften quellfähige Minerale, die Hohlraumbauwerke stark in Mitleidenschaft ziehen können. In frühen Projektphasen, bei Variantenfindung und

Machbarkeitstudien sind diese noch nicht von Bedeutung. Erst bei den Ausschreibungs- und Ausführungsplanungen sind sie in die intensive Betrachtung einzubeziehen.

- Physikochemische Eigenschaften der Wässer. Im Bereich von sulfidischen Mineralisierungen (diese treten in Vulkaniten fast überall auf) weisen Sickerwässer durchwegs sehr niedrige pH-Werte auf. Hohe Sulfatgehalte z.B. in Bohrungen für den Agua Negra Tunnel zeigen, dass hier die Sulfide lokal bereits oxidiert sind. In größerer Tiefe sind die Wässer nicht oxidiert bzw. oxidieren erst beim Übertritt in den Hohlraum. Der niedrige pH-Wert der sulfidischen Wässer (bei Pascua Lama wurden an Quellen pH-Werte um 2 gemessen, in Wasserzutritten zum Tunnel pH-Werte bis hinab zu 4) zerstört langfristig die Tunnelauskleidung und den Tunnel selbst. Bei der Mine „Andina“, nur wenige Kilometer südlich des geplanten chilenischen Portals der Alternative 5 des Corredor Bioceánico Aconcagua, musste der gesamte Förderbandtunnel nach wenigen Jahren des Betriebes saniert werden. Er war weitgehend durch saure Wässer zerstört (pers. Mitt. M. BÖFER).
- Aufgrund der geomorphologischen Assymetrie liegt das chilenische Portal der Andentunnel meist deutlich niedriger als das in Argentinien. Bei größeren Höhenunterschieden kommt es durch Aufwärmung der Luft im Tunnel zu einem Kamineffekt und damit zu starker natürlicher Bewetterung. Dieser natürlichen Bewetterung kann nur durch einen äußerst starken Maschinenpark entgegengewirkt werden, oder man macht sie sich in der Lüftungsplanung zu Nutzen.
- Aus dem gleichen Grund (die Tunnelgradienten fällt gegen Westen) kommt es zu einer Verringerung des hydraulischen Einzugsgebietes auf der argentinischen Seite. Dies erscheint zwar – auf den ersten Blick – quantitativ unerheblich. In ariden und semiariden Gebieten, bei zunehmender Wasserknappheit durch den auch hier zu beobachtenden Klimawandel, kann ein konstanter Abzug von einigen Zehner Litern pro Sekunde zu einer durchaus beachtlichen unerwünschten Umweltauswirkung führen. Dieses Problem ist noch bei keinem der drei Vorhaben Agua Negra Tunnel, Corredor Bioceánico Aconcagua und Túnel Las Leñas, berücksichtigt worden. Einzig der Förderbandtunnel Pascua Lama fällt gegen Argentinien ein, hier befindet sich aber der chilenische Abschnitt oberhalb des Grundwasserspiegels, womit sich hier die Frage nicht stellt.
- Der Permafrost spielt eine theoretische Rolle bei der hydrogeologischen und geothermischen Prognose. Praktisch wird er erst bei der Planung der Erkundungsarbeiten relevant. Das „Ley de Glaciares“, das argentinische Gletschergesetz, schützt neben den Gletschern auch die Blockgletscher und bei weiterer Auslegung jeden gefrorenen Lockerboden im Permafrostbereich. Erkundungsarbeiten, aber auch der Wegebau in diesen Zonen ist rechtlich nicht möglich. Alternativ wären Baustelleneinrichtungen per Helikopter, wobei zu berücksichtigen ist, dass die Tragfähigkeit von Helikoptern bei Höhen jenseits der 4.000m eingeschränkt ist.

6.4 Empfehlung für die weitere Vorgangsweise beim Agua Negra Tunnel

Generell gilt, dass für den Agua Negra Tunnel zwar mehr Erkundungen durchgeführt wurden als für alle anderen binationalen Andentunnel zusammen und das Wissen für südamerikanische Verhältnisse bereits relativ profund ist. Andererseits, verglichen mit euro-

päischen Projekten, ist die geologisch-hydrogeologische Unsicherheit immer noch ausgesprochen hoch.

Die Empfehlung, den späteren Lüftungsstollen von chilenischer Seite aus vorseilend vorzutreiben, sodass die geologischen Erkenntnisse in die Planung der Haupttunnelröhren einbezogen werden können, bleibt bestehen. Während aller Vortriebe ist eine baugologisch-hydrogeologische Dokumentation mit Fortschreibung der Prognose durchzuführen, gegebenenfalls Vorauserkundungen vom Tunnel aus.

6.5 Empfehlungen zur weiteren Vorgangsweise beim Basistunnel des Corredor Bioceánico Aconcagua

Im Zuge der 2008 erstellten Studie (BÖFER, 2008, HÖFER-ÖLLINGER et al., 2008) wurden zahlreiche Fragen aufgeworfen, die bis zum heutigen Zeitpunkt nicht zufriedenstellend gelöst werden konnten. Diese Fragen beeinflussen die Machbarkeit des Vorhabens und sind daher von allergrößter Wichtigkeit.

Im Zeitraum 2009 wurde durch den Autor einerseits die geologische Kenntnis auf Basis der gesammelten Unterlagen vertieft. Ein kostenmäßig günstiges, reduziertes hydrogeologischen Messprogramm kam damals jedoch nicht zustande.

Vielmehr wurde eine umfangreiche Erkundungskampagne erarbeitet, die im Idealfall alle geologisch-hydrogeologischen Fragestellungen klären soll und aus nachfolgenden Elementen besteht:

Geologische Detailkartierung

Vor und während des Erkundungsprogrammes ist eine geologische Detailkartierung des gesamten Untersuchungsgebietes durchzuführen. Diese Arbeiten benötigen im Gegensatz zu den aufwendigen Bohrprogrammen kaum Mobilisierungszeiten. Mit den Ergebnissen sollte das Bohr- und Versuchsprogramm optimiert werden. Dieses Programm wurde auf Basis der bis 2009 vorliegenden Erkenntnisse erarbeitet.

Bohrprogramm

2009 wurde ein Bohrprogramm entwickelt, mit dessen Hilfe das gesamte Bauwerk innerhalb von 14 Monaten erkundet werden sollte. Die Durchführung der Erkundungen in so kurzer Zeit ist schwierig vollständig durchzuführen:

- Viel Zeit für einen Alternativplan gibt es nicht. Daher werden die Varianten nördlich und südlich der Ost-West verlaufenden Las Cuevas Störung gleichzeitig erkundet.
- Die Bohrungen wurden in ihrer Menge daher großzügig geplant. In Abhängigkeit der geologischen Kartierungen, der geophysikalischen Erkundungen und früherer Bohrungen können Bohrungen verschoben oder ganz in ihrer Lage versetzt oder bezüglich des Erkundungsziels geändert werden.

Das Programm besteht aus 25 Bohrungen mit Endteufen zwischen 75 und 1100 m und bezieht sich auf die Alternative 5. Für jede Bohrung wurden das Erkundungsziel definiert, und es wurden drei Datenblätter erstellt:

Das erste, allgemeine Datenblatt enthält Name und Kurzbezeichnung, Land, Koordinaten im Gauss-Krüger-Netz, UTM und absolut (Länge und Breite), Seehöhe, Kurzbeschreibung

des Standorts, Vorschlag für die Zufahrt, Kurzbeschreibung der notwendigen Arbeiten zur Herstellung des Bohrplatzes, vorgeschlagene Quelle für Industrierwasser (Bohrwasser), Abhängigkeiten von anderen Bohrungen, vorgesehene Kombinationen mit anderen Untersuchungen und Priorität.

Das zweite Datenblatt enthält technische Angaben wie Länge, Neigung, Richtung, Mindestdurchmesser des Bohrkerns im Bohrlochtiefsten, Mindestdurchmesser der Bohrung im Bohrlochtiefsten, Angaben zur zu kernenden Strecke, geotechnische Bohrlochversuche, hydraulische Bohrlochversuche, geophysikalische Bohrlochversuche und Bohrlochausbau.

Das dritte Datenblatt enthält Angaben zur geologischen Prognose, zur Strukturgeologie (Streichen und Fallen der Schichten und der Störungen), zur Hydrogeologie, Geothermie und Gasführung.

Dazu wurden Pläne in drei Maßstäben (1:50.000, 1:10.000 und 1:1.000), eine umfassende Fotodokumentation und eine perspektivische Lagedarstellung in Google Earth erstellt.

Die Fragenkomplexe, die durch die Bohrungen geklärt werden sollen, sind:

- Schichtverband. Der Deckenstapel der jurassischen marinen Sedimente ist prinzipiell von der Oberfläche her bekannt. Allerdings – ebenfalls an der Oberfläche ersichtlich – verstellen zahlreiche Verschuppungen, Verfaltungen und Störungen diesen Verband und eine genaue Prognose für den Basistunnel ist ohne Geophysik und Bohrungen zu deren Kalibrierung nicht möglich.
- Hydrogeologie, Gasführungen und Geothermie.
- Lage, Art, Zusammensetzung, Wasserführung und Mächtigkeit von Störungen.
- In-situ-Spannung.
- In-situ-Tests zur Ermittlung von geotechnischen Gebirgseigenschaften.
- Probengewinn für Laborversuche.

Geophysikalisches Messprogramm

Neben den geophysikalischen Bohrlochmessungen wurde ein umfangreiches geophysikalisches Messprogramm, das von von der Oberfläche durchzuführen war, geplant. Hintergrund ist, dass – im Gegensatz zur Situation beim Agua Negra Tunnel – hier die geologischen Strukturen aus mehreren Gründen sehr gut durch geophysikalische Messungen erfassbar sind.

Zum einen handelt es sich um einen Deckenstapel mit unterschiedlichen geophysikalischen Eigenschaften. Diese Stapel konnten an der Oberfläche gut auskartiert werden. Zum anderen liegt der Schichtverband schräg auf einer basalen Überschiebungsfrent. Die Lage und der Aufbau des überschobenen Materials (der Formationen Choiyoi oder Alto Tupungato) sind für die Tunnelplanung (Lage der östlichen Multifunktionsstelle, Zufahrtstunnel zu dieser etc.) von wesentlicher Bedeutung.

Zudem sollte mit Hilfe geophysikalischer Untersuchungen der Herkunft der Puente del Inca Quelle nachgegangen werden.

Es sind nachfolgende geophysikalische Versuche geplant:

- Geoelektrische Sondierungen. Geoelektrik ist im Bereich der Puente del Inca Quelle geplant (Mise a la Masse und „klassische“ Anwendungen der Geoelektrik der „Wenner“ und „Schlumberger“ Methode) sowie im Bereich der Formation Cristo Redentor.
- Gravimetrische Messungen sind im Bereich der Gipsdiapire und des Cristo Redentor Passes vorgesehen.
- Das umfangreichste Programm besteht aus seismischen Erkundungen. Es sind refraktions- und reflexionsseismische Untersuchungen vorgesehen. Acht Profile weisen Längen zwischen 1,1 und 15 km auf, die Eindringtiefe sollte dabei maximal 1,5 km betragen.

Hydrogeologische Untersuchungen

Die in der Kernzone durchgeführte Quellkartierung wird auf einen größeren Bereich ausgedehnt. Von den erhobenen Quellen wird eine Auswahl für ein regelmäßiges Monitoring getroffen.

Das Monitoring enthält quantitative und qualitative Messungen sowie ein Laborversuchsprogramm. Die Messungen werden an Quellen, Vorflutern und an ausgebauten Bohrungen durchgeführt. An ausgewählten Messstellen werden Datensonden zur kontinuierlichen Erfassung von Druckhöhe, Temperatur und Leitfähigkeit eingebaut.

Beim Laborversuchsprogramm wird die Hydrochemie der Ionenbilanz, definierte Indikatorparameter (Brom, Ammonium, Eisen, Mangan, Strontium) und Isotopen erstellt.

Es ist vorgesehen, die Karstsysteme mittels einer umfassenden karsthydrogeologischen Detailkartierung so genau wie möglich von der Oberfläche zu erkunden. Dabei sind auch die Höhlen zu befahren. Auf Basis dieser Erkundungen wird ein Multitracertest mithilfe verschiedener Fluoreszenztracer in unterschiedlichen Einzugsgebieten durchgeführt. Die Fließsysteme sollten zumindest im oberflächennahen hydrogeologischen System so genau wie möglich erkundet werden. Von den Ergebnissen verspricht man sich Unterstützung bei folgenden Fragestellungen:

- Definition und Bilanzierung der oberflächennahen Fließsysteme.
- Ermittlung von Wasserverlusten.
- Kombination des Versuches mit (Leistungs)pumpversuchen in den Bohrungen.
- Ermittlung einer möglichen jungen Komponente des Thermalwassers.
- Erforschung von Fließwegen und Wasserstauern.

Hydraulische Versuche in Bohrungen

Von zumindest einer Bohrung, die in einem größeren Querschnitt ausgeführt wird, ist ein Leistungspumpversuch vorgesehen. Die Bohrung (S12) liegt schräg gegenüber der Puente-del-Inca-Quelle auf der anderen (nördlichen) Talseite und ist so ausgelegt, dass sie die Gesteine des Basements erreicht. In den ergiebigsten Sandsteinen und Konglomeraten der überlagernden Formationen wird die Filterstrecke eingerichtet. Dort wird anschließend

ein Pumpversuch durchgeführt, der eine starken Absenkung erzielen soll. Dabei werden alle Quellläste der Puente del Inca Quelle und alle weiteren Quellen sowie ausgewählte Vorfluter in der Umgebung kontinuierlich beobachtet (und – falls bereits vorhanden – der Wasserspiegel in bereits bestehenden Bohrungen). Idealerweise erfolgt dieser Versuch einige Wochen nach den Einspeisungen für den Multitracertest.

Das geförderte Wasser wird kontinuierlich auf alle vor-Ort-Parameter geprüft (Temperatur, Leitfähigkeit, pH-Wert, Sauerstoffgehalt und E_H -Wert, Schüttungsmenge und Absenkung). Zudem erfolgen stündlich Probenahmen für Fluoreszenztracer, Isotopie und Hydrochemie. Dieselben Parameter werden auch bei den umliegenden Quellen und Vorflutern erhoben.

Mit diesem Versuch soll festgestellt werden, ob es quer zum Las Cuevas Tal wirksame hydrogeologische Verbindungen gibt. Eine starke Absenkung soll eine Entwässerung durch den Tunnel und die Auswirkungen auf die Puente del Inca Quelle simulieren.

Darüber hinaus sind in allen Bohrungen hydraulische Versuche in abgepackten Bohrlochabschnitten vorgesehen, um Transmissivitäten von Gebirgsabschnitten in großer Tiefe zu erhalten.

6.6 Neue Erkenntnisse

Isotopenhydrogeologie

Von Bedeutung sind neue Erkenntnisse zur allgemeinen Isotopenhydrogeologie. Die Proben vom Agua Negra Pass und von Pascua Lama zeigten, dass der in VOGEL et al. (1975) dargestellte Höheneffekt angepasst werden muss (HÖFER-ÖLLINGER & MILLEN, 2013).

Auch die Isotopenergebnisse der Puente del Inca Quelle sind von Bedeutung. Sie zeigen, dass das Modell von RAMOS (1993) in seinen Grundzügen anwendbar sein könnte.

Geothermie

Die Erkenntnisse zur Geothermie stellen wichtige Details zu Fragen des Wärmeflusses als auch zur thermischen Leitfähigkeit der Gesteine. Von Relevanz sind in diesem Zusammenhang auch die Unterschiede der Messergebnisse innerhalb eines einzelnen Tunnelbauwerks, die für den Agua Negra Tunnel mit Bohrlochmessungen ermittelt und für den Basistunnel des Corredor Bioceánico Aconcagua numerisch berechnet wurden.

Permafrost

Die Arbeiten im Permafrost führten zu Herausforderungen für die Bohrtechnik. Seit 2010 durch das Ley de Glaciares („Gletschergesetz“) verboten, konnten noch 2009 im Bereich der gefrorenen Sedimente Zufahrtswege und Bohrplätze angelegt und Bohrungen abgeteufelt werden.

Felsmechanische Daten

Aus den Bohrkernen wurden über hundert Proben für felsmechanische Laboversuche gezogen und zahlreiche geotechnische Daten gewonnen. Dabei stellte sich heraus, dass die Gesteinsfestigkeit der vulkanischen Gesteine geringer als erwartet ist. Das Gestein versagte im Versuch meist an verheilten Klüften, die bei den Probenahmen aufgrund des kompakten Gesamtverbands nicht aufgefallen waren. Die Ergebnisse sind damit weder

dem Gestein noch dem Gebirge zuzuordnen, eine Herausforderung für die geomechanische Planung.

Hydraulische Kennwerte der Grundwasserleiter

Die einzigen Pumpversuche, die verwertbare Ergebnisse gebracht haben, sind die, welche 2010 beim chilenischen Portal des Agua Negra Tunnels durchgeführt wurden. Die These, dass Störungsbereiche im Nahbereich der Kernzone aufgrund des hohen Tongehalts in den Bewegungsflächen niedrigere Durchlässigkeiten als das umgebende, zerlegte Gebirge haben, konnte hier bestätigt werden.

Hydrogeologische Prognosemodelle

Am Beispiel des Agua Negra Tunnels wurde gezeigt, dass die rechnerisch ermittelten Zutrittsmengen höher sind, als die Gesamtmenge des in dem Bereich neu gebildeten Grundwassers. Dies liegt daran, dass die bestehenden Formeln die komplexe hydrogeologische Situation nicht abbilden. So werden für ungestörte Bereiche, aber auch oft für Störungen meist zu hohe Zutrittsmengen prognostiziert. Hier ist weiterhin erheblicher Forschungsbedarf gegeben.

6.7 Expertensystem für die hydrogeologische Prognose tiefliegender Tunnel

Projektsphase

In einem ersten Arbeitsschritt der Projektsphase ist der Planungsstand zu definieren. Die Phasen werden international unterschiedlich bezeichnet und gehandhabt. Zu beachten ist die unterschiedliche Verantwortlichkeit des Geologen in den unterschiedlichen Phasen. Sie kann mitunter in sehr frühen Phasen ausgesprochen hoch sein.

Sensibilität des Planungsgebiets

Es ist in jeder Hinsicht die Sensibilität des Planungsgebiets festzulegen. Dabei sind – aus Sicht der Hydrogeologie – vier Hauptaugenmerke zu beachten:

1. Zutritte bei den Vortrieben,
2. Gesamtabfluss an den Portalen (kurz- und langfristig),
3. Beeinflussung oberflächennaher Fließsysteme,
4. Beeinflussung von Bauwerken an der Oberfläche.

Es ist jedenfalls zu beachten, welche Änderungen im Wasserhaushalt man durch das geplante Bauwerk verursacht. Häufig sind bei Tunnelvorhaben Umwälzungen von Abflussmengen von einem Einzugsgebiet in ein anderes. Dies kann vor allem bei internationalen Vorhaben in (semi)ariden Regionen von Bedeutung sein.

Ist die Sensibilität hinsichtlich der Punkte 2, 3 und 4 gering oder völlig bedeutungslos, z.B. bei Vorhaben in unbesiedeltem Hochgebirge, kann der Fokus auf den ersten Punkt reduziert werden.

Eingangsdaten

Für die hydrogeologische Prognose benötigt man zumindest

- Geologisches Modell,
- Meteorologie und Hydrographie,
- Hydrogeologische Kartierung,
- Bestehende Nutzungen und Beeinflussungen,
- Ergebnisse der Erkundungsprogramme,
- Ergebnisse der hydrogeologischen Messprogramme.

Erkundungen und Risiko

Das Erkundungsprogramm ist der Komplexität und den Projektphasen, insbesondere aber auch der Risikobereitschaft des Bauherrn anzupassen. In diesem Zusammenhang hat der Geologe den Bauherrn objektiv und umfassend zu beraten und eine realistische Risikoabschätzung durchführen. Eine Darstellung, wie weit diese Risiken durch Erkundungen vor oder während des Baus oder durch vertragliche Anpassungen zu beherrschen sind, ist unumgänglich.

Flussdiagramme zur Abhandlung von Spezialthemen

Anhand von sechs Themen zur Hydrogeologie im Untertagebau – wird für die Phasen der Planung (Trassenfindung bis Ausschreibungsplanung) ein Procedere vorgeschlagen.

Tabelle 10 Legende der Flussdiagramme im Expertensystem.

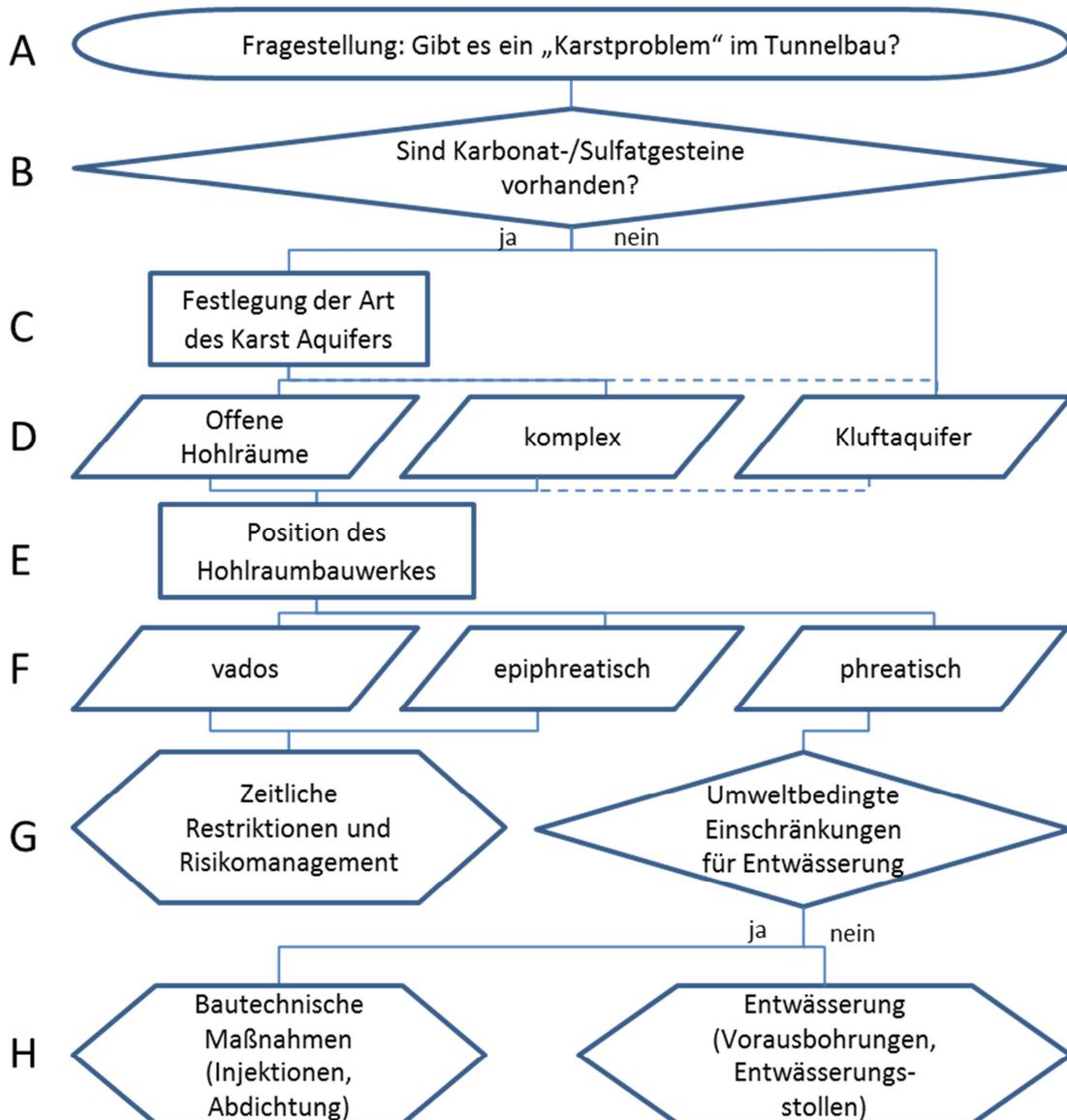
Zeichen	Bedeutung
	Fragestellung
	Prozess (Planung)
	Dateneingang
	Entscheidung
	Ergebnis, weitere Vorgangsweise
	Alternative

Die nachfolgenden Themen werden im Detail behandelt:

1. Vorhandensein von Karst und dessen Behrrschung
2. Hydraulisch bedingte Setzungen
3. Wasserlösliche Gesteine

4. Wassernutzungen, ökologisch sensible Gebiete
5. Geothermie
6. Einzugsgebiete

Karst

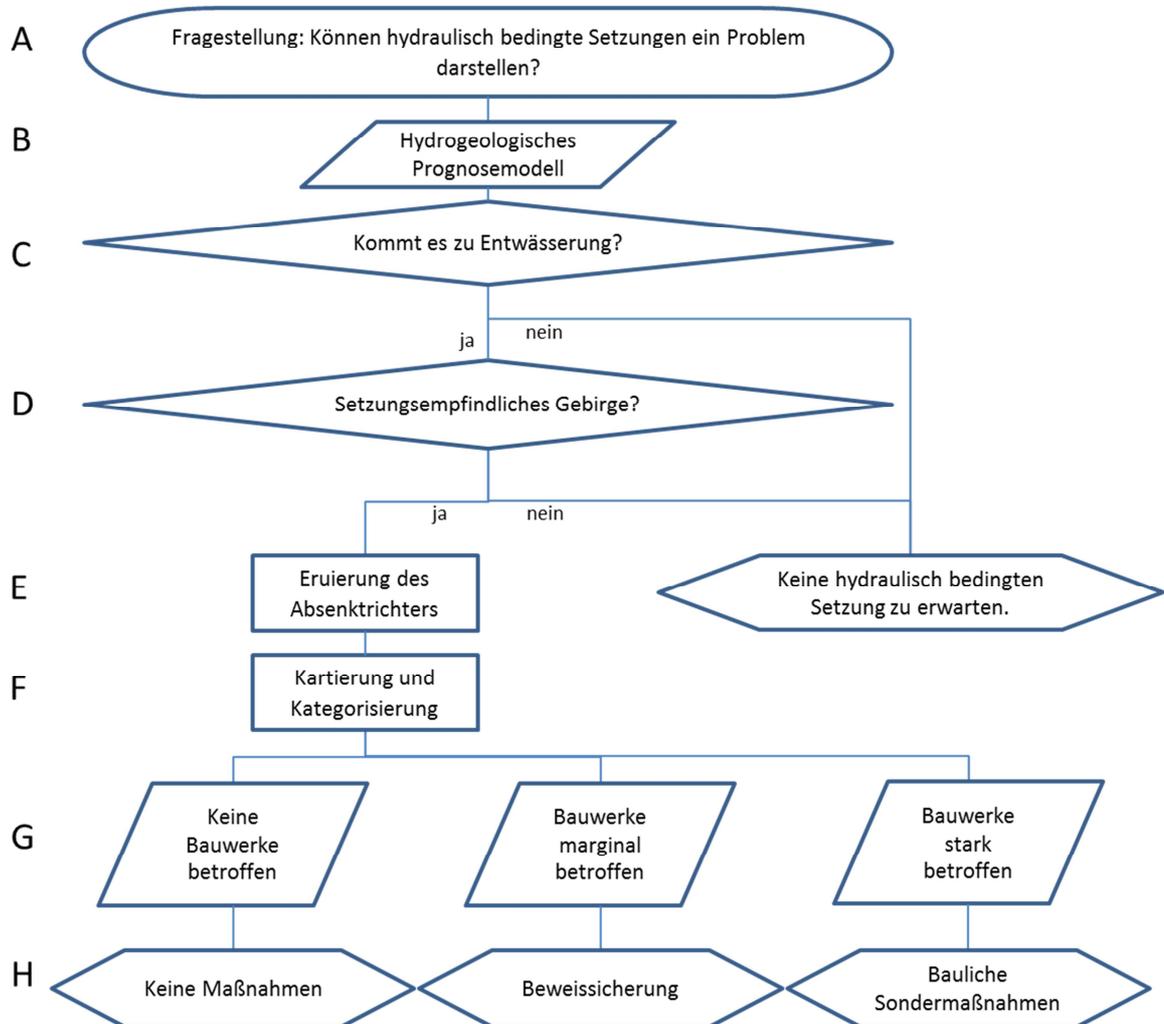


Mit:

- A) Das „Karstproblem“ im Tunnelbau stellt sich mannigfaltig dar. Jedenfalls verursacht Antreffen des Karstphänomens Verzögerungen im Bau, Mehrkosten und schlimmstenfalls Gefährdung von Gerät oder Sicherheit und Gesundheit des Baustellenpersonals.

- B) Kalk, Mergel, Marmor, Dolomit, Silikatmarmor; Gips, Anhydrit; in tropischen Regionen auch: Gneis, Granit, Sandstein.
- C) Der Karst hinsichtlich seiner Geomorphologie, seines geologischen Aufbaues, seiner Strukturgeologie, seines Höhleninventars und seiner Hydrogeologie zu charakterisieren.
- D) Aus Punkt C (Art des Karstgrundwasserleiters) ist für die bautechnische Planung zu abstrahieren, ob es sich um einen Karst mit offenen Hohlräumen (Dolinen, Schächten, Höhlen) oder um eine komplexe Kombination von offenen Hohlräumen mit Klüften und porösen bzw. doppelporösen Abfolgen handelt. Zudem gibt es verkarstete Gebiete, die in vielen Eigenschaften einem Kluftgrundwasserleiter gleichen, aber lediglich lokal begrenzt eine höhere Durchlässigkeit aufweisen.
- E) Meist sind die geometrischen Randbedingungen des Bauvorhabens durch trassierungstechnische Zwangspunkte vorgegeben. Prinzipiell sind drei Szenarien denkbar: Liegen vadoses Grundwasser, phreatische oder epiphreatische Bedingungen vor?
- F) Bei vadosen Bedingungen liegt das geplante Bauwerk oberhalb des Grundwasserschwankungsbereiches. Für Wasserzutritte in den Hohlraum kommen lediglich entlang dieser Hohlräume fließende, meist periodische Gerinne in Frage. Phreatisch steht für den permanent gesättigten Hohlraum. Epiphreatisch ist der interessanteste Abschnitt – es handelt sich um den Grundwasser-Schwankungsbereich, der im Karst eine Vertikaldistanz von mehreren hundert Metern betragen kann.
- G) Falls vados oder epiphreatisch, kann während des Baus mit zeitlichen Einschränkungen und Risikomanagement ein sinnvoller Bauablauf gefunden werden. Die zeitlichen Einschränkungen beinhalten eine Bauzeit in niederschlagsarmen oder kalten Jahreszeiten, je nach Klimazone; das Risikomanagement muss Frühwarnsysteme gegen Wassereinträge beinhalten. Unterbrechungen natürlicher Wasserflüsse sind mit Dükerbauwerken hintanzuhalten. Bei phreatischen Bedingungen hängt die weitere Vorgehensweise von der Belastbarkeit der Umwelt ab: Sind Entwässerungen umweltverträglich oder nicht?
- H) Befindet sich das Vorhaben im phreatischen, also vollkommen gesättigten Bereich und ist aus Sicht des Umweltschutzes keine Absenkung des Grundwasserspiegels möglich, so ist eine mögliche Entwässerung durch geeignete Vorausinjektionen zu mindern bzw. zu verhindern. Steht einer Absenkung des Grundwasserspiegels nichts entgegen, so sind für den Tunnelbau gezielte Entwässerungen durch Bohrungen, Entwässerungstollen oder Brunnen durchzuführen.

Hydraulisch bedingte Setzungen

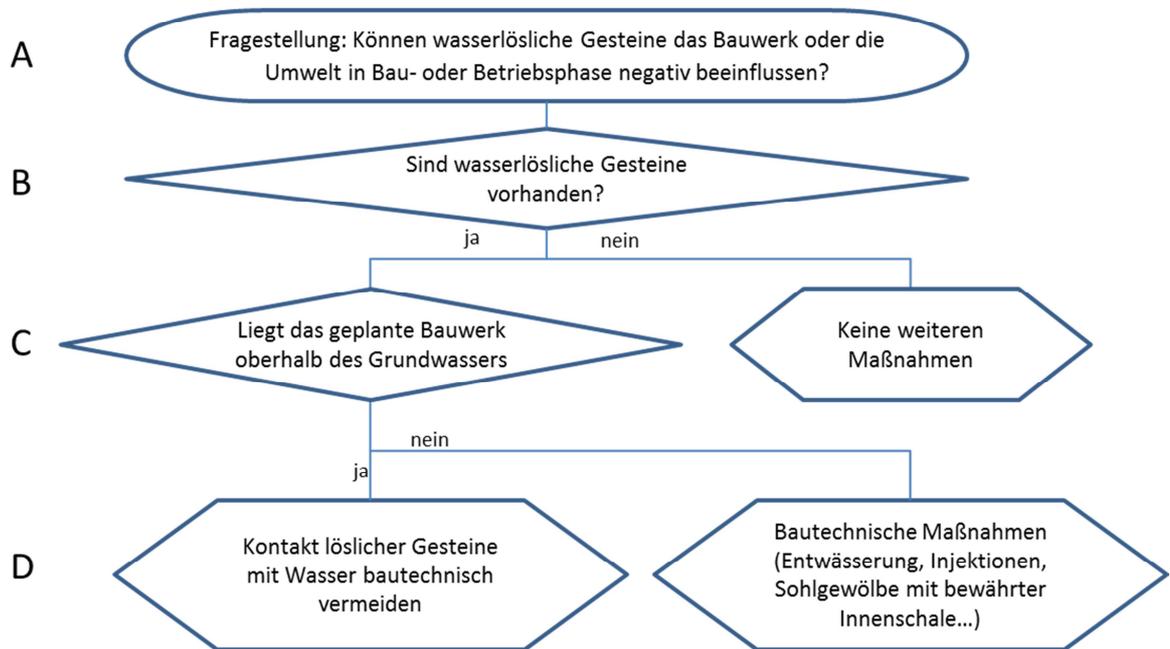


Mit:

- A) Entwässert man einen Grundwasserleiter, ist – in Abhängigkeit der Gebirgsfestigkeit – mit mehr oder weniger intensiven Oberflächensetzungen zu rechnen.
- B) Für die Beantwortung ist ein hydrogeologisches Prognosemodell Voraussetzung.
- C) Auf Basis des Prognosemodells ist zu entscheiden, ob es zu Entwässerung kommt.
- D) Kommt es zu Entwässerung des Gebirges, ist die Sensibilität des Gebirges anhand der geologischen Prognose zu ermitteln. Dabei sind nicht nur das Gebirge unmittelbar um den Tunnel, sondern alle potenziell von einer Entwässerung betroffenen Gebirgsformationen einschließlich der quartären Überlagerung zu berücksichtigen.
- E) Ein theoretischer Absenktrichter ist großzügig zu bemessen.

- F) Im theoretischen Absenktrichter sind alle Gebäude, Infrastrukturen, Einbauten etc. zu kartieren und hinsichtlich ihrer Gefährdung zu kategorisieren.
- G) Auf Basis der Kartierung wird festgelegt, ob und wie Bauwerke betroffen sind.
- H) Bauliche Sondermaßnahmen können sowohl den Tunnelbau (z.B. Hintanhaltung der Entwässerung) als auch das gefährdete Gebäude betreffen. Häufig kommen auch messtechnische Alarmsysteme zum Einsatz.

Lösliche Gesteine

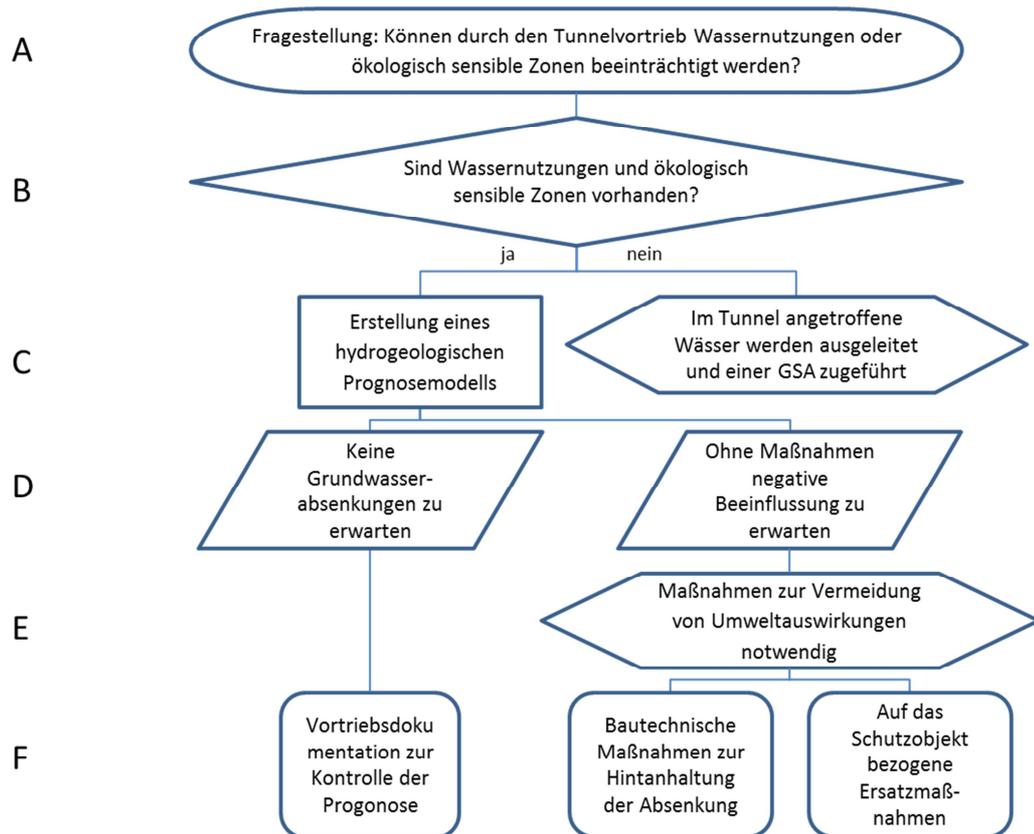


Mit:

- A) Lösliche Gesteine werden hier so definiert, dass ein Lösungsprozess durch Wasser in kurzen Zeiträumen (Wochen bis wenige Jahre) erfolgt. Ein Verkarstungsprozess von z.B. Kalk oder Dolomit wird hier nicht behandelt. Lösliche Gesteine können den Tunnelbau und –betrieb stark beeinträchtigen, umgekehrt können unvorsichtiger Weise durch den Bau hergestellte Wasserwegsamkeiten zu starken negativen Umweltauswirkungen bis weit vom Tunnel entfernt verursachen.
- B) Grundlage für diese Entscheidung ist ein sorgfältig ausgearbeitetes geologisches Modell.
- C) Die mögliche Beeinträchtigung hängt wieder von der Positionierung des Bauwerks in Relation zum Grundwasserspiegel ab.
- D) Liegt das Bauwerk oberhalb des Grundwassers, ist bautechnisch jeder Kontakt von Wasser mit dem löslichen Gestein zu vermeiden (z.B. sofortiges Fassen und Abpumpen zutretender Wässer, geschlossenes Drainagesystem, Trockenbohren). Liegt das Bauwerk unterhalb des Grundwasserspiegels und ist ein Kontakt des löslichen Gesteins mit Grundwasser schon gegeben oder unvermeidbar, so ist

vorzusehen, dass es zu keiner Fließbewegung kommt. Das stagnierende Grundwasser dürfte beim Antreffen von löslichem Gestein gesättigt sein, erst ein künstlich hergestellter Grundwasserfluss würde Material abführen. Bei Vorkommen von Gips und Anhydrit ist zudem davon auszugehen, dass zwar Gips relativ leicht löslich ist, Anhydrit bei Wasseraufnahme und Umwandlung zu Gips an Volumen zunimmt und die Tunnelsohle oder Laibung zerstören kann.

Wassernutzungen, Biotope

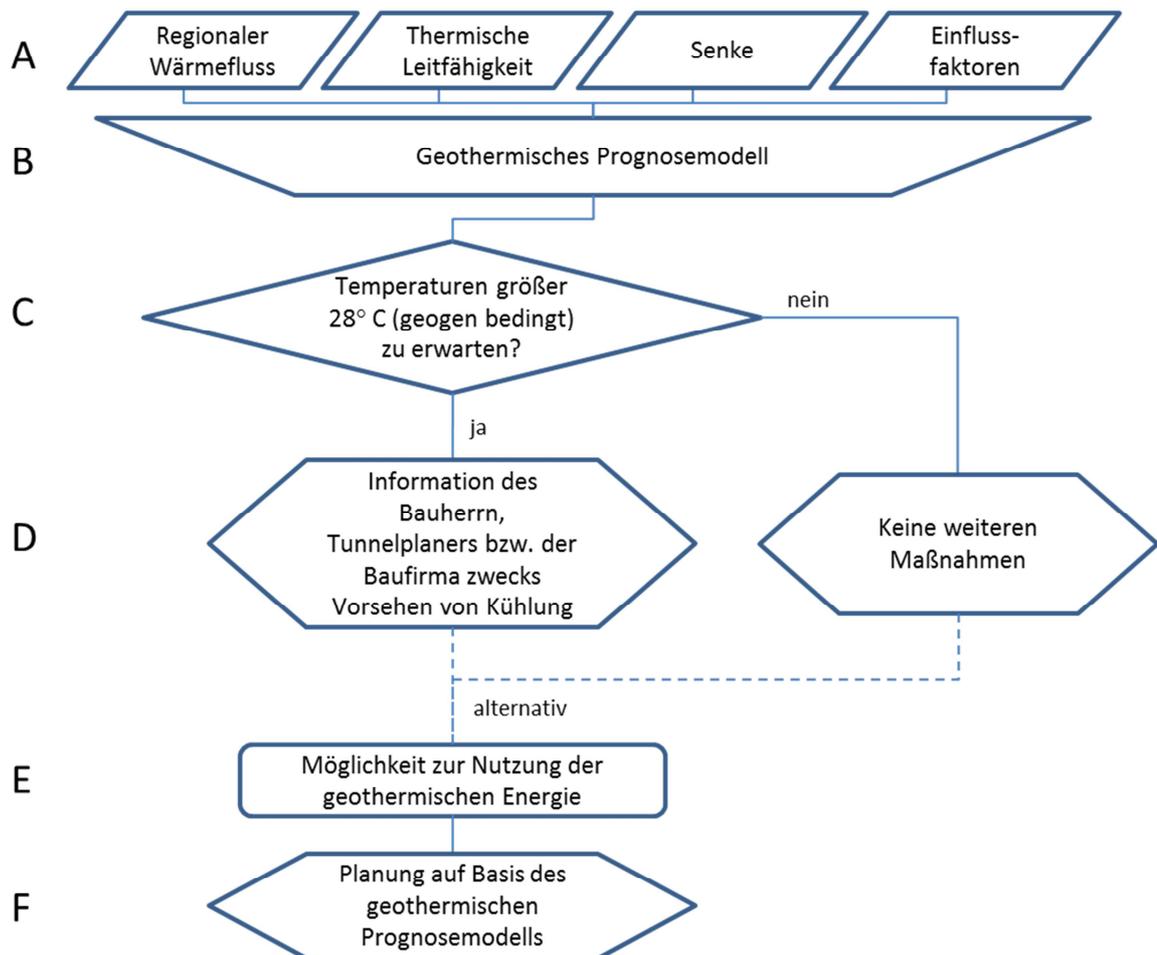


Mit:

- A) Diese Fragestellung ist eine der wesentlichen Fragen im Tunnelbau – Beeinträchtigung von Wasserversorgungsanlagen, Quellen, Gebirgsbächen, Seen, Kraftwerken, Fischzuchten, Biotopen, Wäldern, landwirtschaftlich genutzten Flächen etc.
- B) Grundlage für diese Fragestellung ist eine entsprechende Kartierung.
- C) Das hydrogeologische Prognosemodell ist Basis für alle weiteren Entscheidungen. Liegen weder sensible Zonen und Nutzungen, noch sonstige Einschränkungen vor, kann das im Tunnel angetroffene Wasser gesammelt und über eine Gewässerschutzanlage ausgeleitet werden.
- D) Entweder sind keine flächenhaften Grundwasserabsenkungen zu erwarten (weil die Gesteinsschichten äußerst geringe Durchlässigkeiten aufweisen, oder das Bauwerk oberhalb des Grundwasserspiegels liegt), oder es kommt theoretisch – ohne zusätzlicher Maßnahmen – zu einer negativen Beeinflussung.

- E) Die Maßnahmen zur Vermeidung von Umweltauswirkungen können im Zuge des Baues oder mit Bezug auf das Schutzobjekt erfolgen:
- F) Bautechnische Maßnahmen sind z.B. vorausseilende Injektionen zur Hintanhaltung der Absenkung, Beaufschlagung des Vortriebsbereiches mit Luftüberdruck, Vereisung etc. Auf das Schutzobjekt bezogene Ersatzmaßnahmen sind Ablösen, Ersatzwasserversorgung etc.

Geothermie

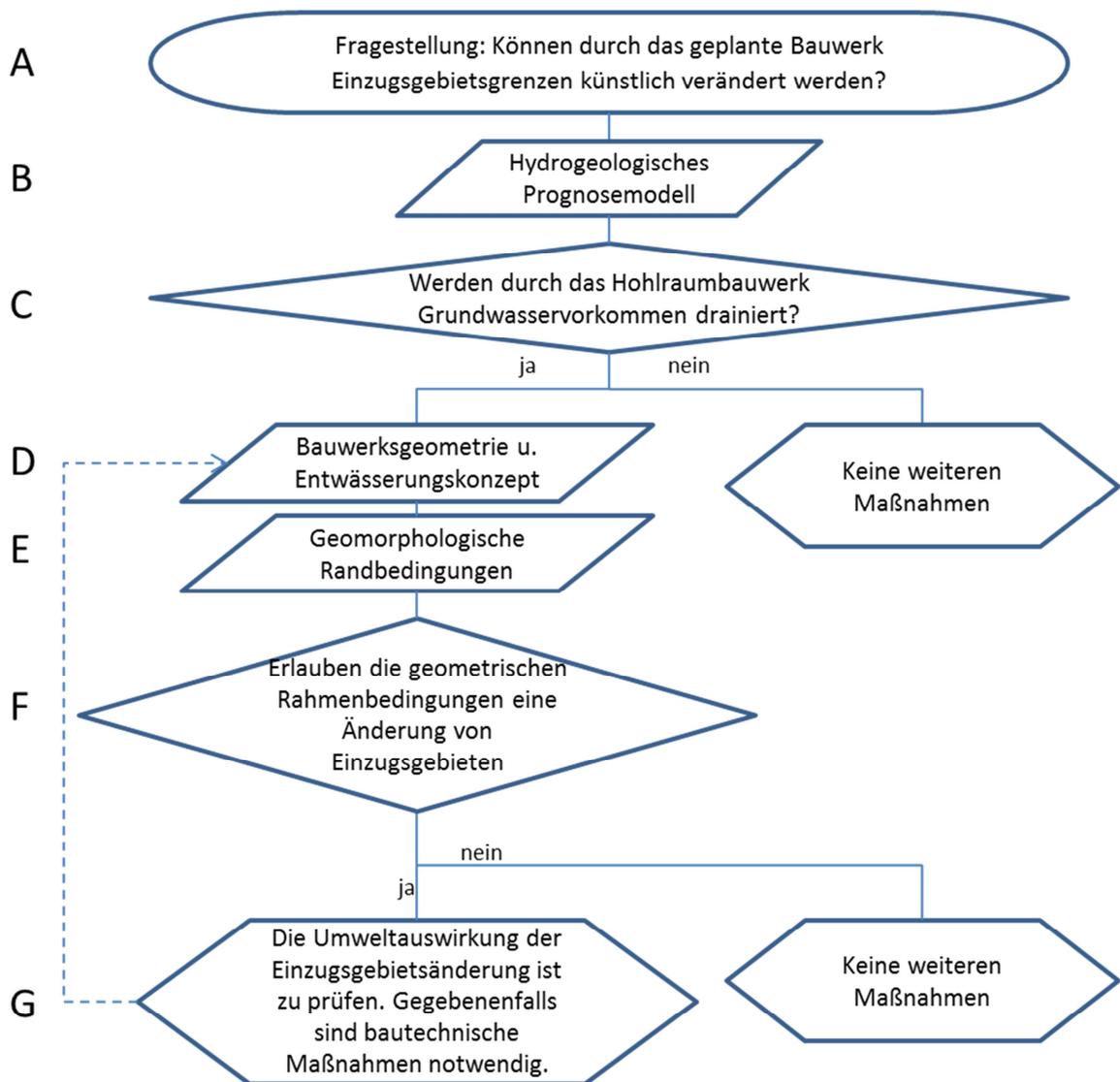


Mit:

- A) Die rechnerischen Einflussparameter sind der regionale Wärmefluss, die thermische Leitfähigkeit und die Lage der Senke (Erdoberfläche). Einflussfaktoren stören die Prognose: Es handelt sich um konvektiven Wärmetransport durch Grundwasser als wichtigsten und meist maßgeblichen Einflussfaktor neben anderen Faktoren von geringerer Bedeutung.
- B) Die Modellerstellung kann auf Literaturwerten begonnen und mit jeder Projektphase durch im Zuge der Erkundungen gewonnene Daten verbessert werden.

- C) 28°C beziehen sich auf das Gebirge und das Grundwasser. Höhere Temperaturen, die durch die Wärmeabgabe der Baugeräte im Vortriebsbereich entstehen, sind nicht Inhalt dieser Betrachtungen.
- D) Sind höhere Temperaturen zu erwarten, hat dies Auswirkung auf die Baugestaltung (Kühlbedarf im Zuge der Sicherheits- und Gesundheitsplanung, Abbindezeiten des Spritzbetons).
- E) + F) Alternativ sollte bei jedem Bauwerk über eine Nutzung der geothermischen Energie an der Tunnellaibung oder des Grundwassers nachgedacht werden.

Einzugsgebiete



Mit:

- A) Die Fragestellung der Einzugsgebiete ist bei Basistunnelvorhaben von grundlegender Bedeutung. Hintergrund sind Nutzungsrechte z.B. von Kraftwerken und Ansprüche auf Bewässerung. In ariden Gebieten ist dies besonders zu beachten.
- B) Die Basis für die Bearbeitung dieser Frage ist das hydrogeologische Prognosemodell.
- C) Die Einzugsgebiete können sich nur dann ändern, wenn es zu Wasserzutritten bzw. -ableitungen kommt.
- D) Falls es einen solchen gibt, stellt sich die Frage nach der Stelle des zentralen Hochpunkts. Auch wenn dieser z.B. unter der Landesgrenze liegt, muss dies für den Grundwasserabfluss noch nicht heißen, dass sich nichts ändert. Es gibt auch einseitig geneigte Tunnel, bei denen – ohne technische Maßnahmen – alle zutretenden Wässer gravitativ zum niedriger gelegenen Portal fließen.
- E) Flussnetz und Geländemodell.
- F) Es versteht sich von selbst, dass diese Fragestellung nur dann relevant ist, wenn die Portale in unterschiedlichen Einzugsgebieten liegen. Bei Lehnentunnel, deren Portalsituationen demselben Gewässer tributär sind wird sich diese Frage nur in Ausnahmefällen stellen.
- G) Bautechnische Maßnahmen können Anlagen sein, die entsprechende Teile des Bergwassers in dessen Einzugsgebiet zurückpumpen. Solche Anlagen sind teuer im Betrieb und wartungsanfällig. Weitere Alternativen sind ausgleichende künstliche Wasserversorgung an Stellen, wo dies möglich ist, oder monetäre Entschädigungen. Für diese Alternativen ist eine exakte Quantifizierung notwendig, die durch Messwehre an definierten Stellen im fertig gestellten Tunnel mit automatischer Aufzeichnung ermöglicht werden kann.

6.8 Ausblick

Mit der Erstellung des Planungsleitfadens „Tiefliegende Tunnel“ des gleichnamigen Arbeitskreises der ÖSTERREICHISCHEN GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK wird ein wesentlicher Beitrag dazu geleistet, Fehler zukünftig zu vermeiden bzw. wichtige Elemente unbeachtet zu lassen. Der Verfasser ist im Arbeitskreis für den Bereich „Gebirgsmodell“ für die Themen Geologie und Hydrogeologie verantwortlich (ÖSTERREICHISCHER GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK, 2012). Der Leitfaden befindet sich in Ausarbeitung und sollte später genauso wie die Richtlinie zur Geotechnischen Planung von Untertagebauarbeiten im Zyklischen Vortrieb (ÖSTERREICHISCHER GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK, 2008) in mehrere Sprachen übersetzt und ein weltweiter Mindeststandard hinsichtlich der geologisch-hydrogeologischen Bearbeitung tiefliegender Tunnel hergestellt werden. Neben den Erkenntnissen bei Planung und Bau der großen Alpentunnel werden in den Leitfaden auch die Erfahrungen der binationalen Andentunnel einfließen.

Gleichzeitig zu den österreichischen Leitfäden wird auf internationaler Ebene ein Planungsleitfaden für Erkundungsarbeiten für Tunnelvorhaben im Zuge der INTERNATIONAL TUNNEL ASSOCIATION (ITA) erstellt. Bei dieser „*Strategy for Site Investigation of Tunnelling Projects*“ fließen auch die Erkenntnisse des Verfassers von europäischen, asiatischen und südamerikanischen Projekten ein.

Politische Änderungen in Argentinien und Chile bringen zum Zeitpunkt der Ausfertigung dieser Zeilen eine positive Dynamik in die Entwicklung der Infrastrukturbauwerke. Insbesondere die Projekte TAN und Las Leñas dürften noch im gegenständlichen Jahrzehnt in die Ausschreibungsphase für den Bau gehen. Für den Eisenbahnbasistunnel des Corredor Bioceánico Aconcagua hingegen hat sich die Situation verschlechtert, das Projekt dürfte zu visionär und zu risikobehaftet sein.

7 QUELLENVERZEICHNIS

7.1 Literatur

AGUIRRE LE BERT, L. (1960): Geología de Los Andes de Chile Central, provincia de Aconcagua. – Boletín Instituto Investigaciones Geológicas, 9.

ALBRECHT, F. (1962): Die Berechnung der natürlichen Verdunstung (Evapotranspiration) der Erdoberfläche aus klimatischen Daten. – Bericht Deutscher Wetterdienst, 83, (11), 16 S.

ALVAREZ, P.P. & RAMOS, V.A. (1999): The Mercedario rift system in the principal Cordillera of Argentina and Chile (32° SL). – Journal of South American Earth Sciences, 12, 17-31.

ANDERSON, M.; ALVARADO, P.; ZANDT, G. & BECK, S. (2007): Geometry and brittle deformation of the subducting Nazca Plate, Central Chile and Argentina. – Geophys. J. Int., 171, 419-434.

ANTINAO, J.L. & GOSSE, J. (2008): Large rockslides in the Southern Central Andes of Chile (32-34.5°S): Tectonic control and significance for Quaternary landscape evolution. - Geomorphology.

APARICIO, E.P. (1975): Mapa Geológico de San Juan. – Universidad Nacional de San Juan, Instituto de Investigaciones Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.

APARICIO, E.P. (1984): Geología de San Juan. – 115 S., Universidad Nacional de San Juan, Instituto de Investigaciones Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

ARMIJO, R.; RAULD, R.; THIELE, R.; VARGAS, G.; CAMPOS, J.; LACASSIN, R. & KAUSEL, E. (2010): The West Andean Thrust, the San Ramón Fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile. – Tectonics, 29, 1-34, American Geophysical Union.

BANNER, J.L. (2004): Radiogenic isotopes: systematics and applications to earth surface processes and chemical stratigraphy. – Earth-Science Reviews, 65, 141-194.

BARCLAY, W.S. (1910): The First Transandine Railway. – The Geographical Journal, 36, (5), 553-562.

BENSE, V.F.; GLEESON, T.; LOVELESS, S.E.; BOUR, O. & SCIBEK, J. (2013): Fault zone hydrogeology. – Earth-Science Reviews, 127, 171-192.

BÖTTCHER, M. & USDOWSKI, E. (1993): $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ Ratios of the dissolved Sulphate of River, Well and Spring Waters in a Gypsum-Carbonate Karst Area at the Southwest Edge of the Harz Mountains - Z. dt. geol. Ges., 144, 471-477.

BURKE, W.H., DENISON, R.E., HETHERINGTON, E.A., KOEPNICK, R.B., NELSON, H.F. & OTTO, J.B. (1982): Variation of seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ throughout Phanerozoic time. – Geology, 10, 516-519.

BUSSLINGER, A. (1998): Geothermische Prognosen für tiefliegende Tunnel. – Diss. ETH Nr. 12715, Zürich.

- BUSSLINGER, A. & RYBACH, L. (1997): Prognosis of temperatures and water inflow zones in deep tunneling: examples from the NEAT-project, Swiss Alps. – In: GOLSER, HINKEL & SCHUBERT (Eds). "Tunnels for people": Ed. Balkema, 9-25.
- CABALLÉ, M. (1986): Estudio geológico del sector oriental de la Cordillera Frontal entre los ríos Manrique y Calingasta (Provincia de San Juan). – Diss. Univ. Nac. de La Plata.
- CAMINOS, R. (1965): Geología de la vertiente oriental del cordón del Plata, Cordillera Frontal de Mendoza. – Revista de la Asociación Geológica Argentina 20.3, 351-392.
- CEGARRA, M.I.; LO FORTE, G.L. & SANGUINETTI, A.S. (1993): La Alta Cordillera de Mendoza entre Puente Del Inca y Las Cuevas (32°50' Lat.S.). – Actas del XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Mendoza, 2: 85-93.
- CEGARRA, M.I.; RAGONA, D.E.; GARCÍA ESPINA, R.; GONZÁLEZ, P.; LO FORTE, G. & SATO, A.M. (1998): Carta Geológica 1:100.000 N° 3169-20 "Castaño Nuevo" Provincia de San Juan, Argentina. – SEGEMAR Inédita.
- CHARRIER, R. (1973): Interruptions of Spreading and the Compressive Tectonic Phases of the Meridional Andes. – Earth and Planetary Science Letters, 20, 242-249.
- CHEN, Y.-F.; ZHENG, H.-K.; WANG, M.; HONG, J.-M. & ZHOU, C.-B. (2015): Excavation-induced relaxation effects and hydraulic conductivity variations in the surrounding rocks of a large-scale underground powerhouse cavern system. – Tunnelling and Underground Space Technology, 49, 253-267.
- CLAUSER, C. & HUENGES, E., (1995): Thermal conductivity of rocks and minerals. – In: AHRENS, T.J. (Ed.), Handbook of Physical Constants. American Geophysical Union, Washington, D.C., 105-126.
- CLAYPOOL, G., HOLSER, W., KAPLAN, I., SAKAI, H. & ZAK, I. (1980): The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation. – Chemical Geology, 28, 199-260.
- CORTI, H. (1924): Contribución al estudio de las aguas termo minerales del Puente Del Inca. – Dirección General de Minas, Geología e Hidrología, Publicación 1.
- CRAIG, H. (1961): Isotopic Variations in Meteoric Waters. – Science, 133, 1072-1073.
- DANSGAARD, W. (1964): Stable isotopes in precipitation. – Tellus, 16, 436-468.
- DARWIN, C.R. (1846): Geological observations on South America. Being the third part of the geology of the voyage of the Beagle, under the command of Capt. Fitzroy, R.N. during the years 1832 to 1836. – Smith Elder and Co., 280 S., London.
- DESSANTIS, R.N. Y CAMINOS, R. (1967): Edades potasio-argón y posición estratigráfica de algunas rocas ígneas y metamórficas de la Precordillera, Cordillera Frontal y Sierra de San Rafael, provincia de Mendoza. – Revista de la Asociación Geológica Argentina 22.2, 135-162.
- EL TANI, M. (1999): Water inflow into tunnels. – In: Proceedings of the World Tunnel Congress. ITA-AITES 1999, Oslo, 61–70.

- EL TANI, M. (2003): Circular tunnel in a semi-infinite aquifer. – *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18, 49–55.
- EL TANI, M. (2010): Helmholtz evolution of a semi-infinite aquifer drained by a circular tunnel. – *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25, 54-62.
- EVANS, J.P.; FORSTER, C.B. & GODDARD, J.V. (1997): Permeability of fault-related rocks, and implications for hydraulic structure of fault zones. – *Journal of Structural Geology*, 19, (11), 1393-1404.
- FAULKNER, D.R.; JACKSON, C.A.L.; LUNN, R.J.; SCHLISCHE, R.W.; SHIPTON, Z.K.; WIBBERLEY, C.A.J. & WITHJACK, M.O. (2010): A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. – *Journal of Structural Geology*, 32, 1557-1575.
- FARÍAS, M.; COMTE, D.; CHARRIER, R.; MARTINOD, J.; DAVID, C.; TASSARA, A.; TAPIA, F. & FOCK, A. (2010): Crustal-scale structural architecture in central Chile based on seismicity and surface geology: Implications for Andean mountain building. – *Tectonics*, 29, 1-22, American Geophysical Union.
- FOURNIER, R.O. (1979): A revised equation for Na-K geothermometer. – *Geoth. Res. Council, Transactions*, 3, 221-224.
- Fournier, R.O. (1985): The behaviour of silica in hydrothermal solutions. – In: Berger, B.R. & Bethke, P.M. (Hrsg): *Geology and Geochemistry of Epithermal Systems*, 45-61.
- FOURNIER, R.O. & TRUESDELL, A.H. (1973): An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. – *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, 1255-1275.
- FRUTOS, J. (1981): Andean tectonics as consequence of sea floor spreading. – *Tectonophysics*, 72, T21-T32.
- GARGINI, A.; VINCENZI, V.; PICCININI, L.; ZUPPI, G.M. & CANUTI, P. (2008): Groundwater flow systems in turbidites of the Northern Apennines (Italy): natural discharge and high speed railway tunnel drainage. – *Hydrogeology Journal*, 16, 1577-1599.
- GIAMBASTIANI, M. (2005): Comportamento dependente do tempo do rochas sulfáticas de anidrita e gipso. – Unveröff. Diss. Univ. de São Paulo, 465 S.
- GIGGENBACH, W. F. (1988): Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52, 2749-2765.
- GIGGENBACH, W.F.; GONFIANTINI, R.; JANGI, B.L. & TRUESDELL, A.H. (1983): Isotopic and chemical composition of Parbati valley geothermal discharges, NW-Himalaya, India. – *Geothermics*, 12, 199-222.
- GOODMAN, R. E., MOYE, D. G., SCHALKWYK, A. & JAWANDEL, I. (1965): Groundwater inflows during tunnel driving. – *Eng. Geol.*, 2/1, 39-56.
- GÖTZINGER, M.A., LEIN, R. & PAK, E. (2001): Geologie, Mineralogie und Schwefelisotopie ostalpiner „Keuper“-Gipse; Vorbericht und Diskussion neuer Daten – *Mitt. Österr. Min. Ges.*, 146, 95-96.

- GROEBER, P. (1918): Edad y extensión de las estructuras de la Cordillera entre San Juan y Nahuel Huapí. – *Physis*, 4. 17, 208-240.
- GROEBER, P. (1946): Observaciones geológicas a lo largo del meridiano 70. – *Revista de la Sociedad Geológica Argentina*, Buenos Aires 01.3, 177-208.
- GROEBER, P. (1947): Observaciones geológicas a lo largo del meridiano 70°. 2 Hojas Sosneado y Maipo. – *Sociedad Geológica Argentina*, Buenos Aires, 02.2, 141-176.
- GROEBER, P. (1951): La Alta Cordillera entre las latitudes 34° y 29°30'. – *Museo Argentino de Ciencias Naturales Bernardino Rivadavia*, *Geología* 1.5, Buenos Aires.
- GROEBER, P.; STIPANICIC, P. & MINGRAMM, A. (1953): Jurásico. – In: *Geografía de la República Argentina*, II (1), Mesozóico, 143-347.
- GULISANO, C.A.; Gutierrez Pleimling, A.R. & Digregorio, R.E. (1984): Esquema estratigráfico de la secuencia Jurásica del oeste de la provincia del Neuquén. – IX Cong. Geol. Arg., Actas I, 236-259.
- HAUDE, W. (1955): Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise. – *Mitt. Dt. Wetterd.*, 2, (11).
- HÖFER-ÖLLINGER, G. & MILLEN, B. (2010): Geothermal prognoses for tunnels in the Andes. – *Geomechanics and Tunneling*, 3, (5), 622-633.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (2009): Atlas of isotope hydrology – the Americas. – 196 S., Wien.
- INTERNATIONAL TUNNELLING AND UNDERGROUND SPACE ASSOCIATION (2010): ITA Report N°004 – Long tunnels at great depth. – 32 S., Longrine, Avignon.
- JABOYEDOFF, M. (1999): Modèles thermiques simples de la croûte terrestre: un regard sur les Alpes. – *Bull. Soc. Vaud. Sc. Nat.*, 86, (4), 229-271.
- JACOB, C. E. & LOHMANN, S. (1952): Nonsteady flow in a well of constant drawdown in an extensive aquifer. – *Transactions of the American Geophysical Union*, 3, 559-569.
- JIANGHUA, ZH. & GUOLIANG, CH. (1988): Some new ideas on the prediction of tunnel inflow in karst area by water balance method. – IAH 21st Congress, Karst Hydrogeology and Karst Environment Protection, Guilin, China.
- KAWECKI, M.W. (2000): Transient flow to a horizontal water well. – *Ground Water*, 38, (6), 842-850.
- KAY, S.M.; MAKSAEV, V.; MOSCOSO, R.; MPODOZIS, C.; NASI, C. & GORDILLO, C.E. (1988): Tertiary Andean Magmatism in Chile and Argentina between 28°S and 33°S: Correlation of magmatic chemistry with a changing Benioff zone. – *Journal of South American Earth Sciences*, 1, 21-38.
- KELSALL, P.C.; CASE, J.B. & CHABANNES, C.R. (2004): Evaluation of excavation-induced changes in rock permeability *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 21, 123-135 (1984)
- KEMPE, S. (1996): Gypsum Karst of Germany. – *Int. J. Speleol.*, 25, (3-4), 209-224.

- KHARAKA, Y. & MARINER, R. (1989): Chemical geothermometers and their application to formation waters from sedimentary basins. – In: NAESER, N.D. & MCCULLOCH, T. (Eds), *Thermal History of Sedimentary Basins: Methods and Case Histories*, Springer-Verlag, New York: 99-117.
- KILCHMANN, S.; WABER, H.N.; PARRIAUX, A., & BENSIMON, M., (2004): Natural tracers in recent groundwaters from different Alpine aquifers. – *Hydrogeology Journal*, 12, (6), 643-661.
- KOLYMBAS, D. & WAGNER, O. (2007): Groundwater ingress to tunnels – the exact analytical solution. – *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22, 23-27.
- KROUSE, H.R. (1980): Sulphur isotopes in our environment. – In: P. FRITZ & J.C. FONTES (Editors), *Hand-book of Environmental Isotope Geochemistry Vol. 1, The Terrestrial Environment*, Elsevier, Amsterdam: 435-471.
- LEANZA, H.A. & HUGO, C.A. (1978): Sucesión de ammonites y edad de la Formación Vaca Muerta y sincrónicas entre los paralelos 35° y 40° l.s. Cuenca Neuquina-Mendocina. – *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 32, (4), 248-264.
- LEI, S. (1999): An analytical solution for steady flow into a tunnel. – *Ground Water*, 37, (1), 23-26.
- LEIVA, J.C.; CABRERA, G.A. & LENZANO, L.E. (2007): 20 years of mass balances on the Piloto glaciar, Las Cuevas river basin, Mendoza, Argentina. – *Global and Planetary Change*, 59, 10-16.
- LÖW, S. (2002): Groundwater hydraulics and environmental impacts of tunnel in crystalline rocks. – In: BARLA, G. & BARLA, M. BOLOGNA (eds.): *Le opere in sotterraneo e il rapporto con l'ambiente*, 201-218.
- MARÉCHAL, J.C. & PERROCHET, P. (2003): Nouvelle solution analytique pour l'étude de l'interaction hydraulique entre les tunnels alpines et les eaux souterraines. – *Bull. Soc. Geol. Fr.*, 174, (5), 441-448.
- Martino, J.B. & Chandler, N.A. (2004): Excavation-induced damage studies at the Underground Research Laboratory. – *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, 1413-1426.
- MATTER, A., PETERS, T. & RAMSEYER, K. (1987): $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse und Sr-Gehalte von Tiefen Grundwässern, Mineralien sowie Gesteinen aus dem Kristallin und der Trias der Nordschweiz. – *Eclogae geol. Helv.*, 80, (2), 579-592.
- MILLEN, B.; HÖFER-ÖLLINGER, G. & BRANDL, J. (2015): Change in Hydraulic Properties or Rock Mass Due to Tunnelling. – In: LOLLINO, G. et al. (Hrsg): *Engineering Geology and Society and Territory – 6*, 937-940, Springer, Schweiz.
- MOOK, W.G. (2000): Environmental isotopes in the hydrological cycle. – IHP-V technical documents in hydrology, 39, vol. I-VI. UNESCO/IAEA, Paris/Vienna.
- MOREIRAS, S.M. (2004): Landslide incidence zonation in the río Mendoza valley, Mendoza Province, Argentina. – *Earth Surface Processes and Landforms*, 29, 255-266.

- MOREIRAS, S.M. (2005a): Landslide susceptibility zonation in the Rio Mendoza Valley, Argentina. – *Geomorphology*, *66*, 345-357.
- MOREIRAS, S.M. (2005b): Climatic effect of ENSO associated with landslide occurrence in the Central Andes, Mendoza Province, Argentina. – *Landslides*, *2*, 53-59.
- MOREIRAS, S.M. (2006): Frequency of debris flow and rockfall along the Mendoza river valley (Central Andes), Argentina: Associated risk and future scenario. – *Quaternary International*, *158*, 110-121.
- MPODOZIS, C. & CORNEJO, P. (1988): Hoja Pisco Elqui, IV Región de Coquimbo. Carta Geológica de Chile 1:250.000, N° 68.
- MUSKAT, M. (1937): The flow of homogeneous fluids through porous media. – *Int. Ser. i. Physics.*, 763 S.
- ODEH, A.S. & BABU, D.K. (1990): Transient flow behaviour of horizontal wells: pressure draw-down and buildup analysis. – *SPE Formation Evaluation*. March 7-15, Paper SPE 18802, Dallas, Texas.
- PALMER, M.R.; HELVACI, C. & FALLICK, A.E. (2004): Sulphur, sulphate oxygen and strontium isotope composition of Cenozoic Turkish evaporates. – *Chem. Geol.*, *209*, 341-356.
- PANARELLO, H.O.; DAPEÑA, C.; GARCÍA, E.P. & ÁLVAREZ, A. (1993): Estudio isotópico e hidroquímico de los acuíferos de la cuenca norte mendozina (ríos Mendoza y Tunuyan). – XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración Hidrocarburos, Actas T° VI, 197-207.
- PARK, K.H.; LEEB, J.-G. & OWATSIRIWONGA, A. (2008): Analytical solution for steady-state groundwater inflow into a drained circular tunnel in a semi-infinite aquifer: a revisit. – *Tunnelling and Underground Space Technology*, *23*, 206-209.
- PASTORELLI, S.; MARINI, L. & HUNZIKER, J. (2001): Chemistry, isotope values and temperatures of the water inflows in two Gotthard tunnels, Swiss Alps. – *Applied Geochemistry*, *16*, 633-649.
- PAYTAN, A.; GRAY, E.T.; MA, Z.; ERHARDT, A. & FAUL, K. (2011): Application of sulphur isotopes for stratigraphic correlation. – *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 2011, 1-11.
- PEARSON, F.J.; BALDERER, W.; LOOSLI, H.H.; LEHMANN, B.E.; MATTER, A.; PETERS, T.; SCHMASSMANN, H. & GAUTSCHI, A. (1991): Applied Isotope Hydrogeology. A Case Study in Northern Switzerland. – *Studies in Environmental Science*, *43*, 439 S.
- PERROCHET, P. (2005a): Confined Flow into a Tunnel during Progressive Drilling: An Analytical Solution. – *Ground Water*, *43*, (6), 943-946.
- PERROCHET, P. (2005b): A simple solution to tunnel or well discharge under constant drawdown. – *Hydrogeology Journal*, *13*, 886-888.
- PERROCHET, P. & DEMATTEIS, A. (2007): Modeling Transient Discharge into a Tunnel Drilled in a Heterogeneous Formation. – *Ground Water*, *45*, (6), 786-790.

- POLANSKI, J., (1958): El bloque variscico de la Cordillera Frontal de Mendoza. – Revista de la Asociación Geológica Argentina, 12.3, 165-196.
- POLANSKI, J., (1964): Descripción geológica de la Hoja 25 a, Volcán San José. – Dirección Nacional de Geología y Minería, Boletín N° 98. Buenos Aires.
- PUSCH, R. (1989): Alteration of the hydraulic conductivity of rock by tunnel excavation. – International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 26, 79-83.
- QUARTINO, B., (1967): The Upper Paleozoic or Triassic volcanic pyroclastic and ignimbritic accumulation in the northern Frontal Cordillera, Argentine. – I Simposio Internacional y Paleontológico. Gondwana. Resúmenes, 40-41.
- QUARTINO, B., (1969): Perfil Cordillerano al oeste de Calingasta, provincia de San Juan, República Argentina. – Revista de la Asociación Geológica Argentina 26.4, 389-392.
- QUARTINO, B. & ZARDINI, R. (1967): Geología y petrología de la Cordillera de Colangüil y las serranías de Santa Rosa y San Guillermo, Cordillera Frontal de San Juan. Magmatismo, metamorfismo y metalogénesis. – Revista de la Asociación Geológica Argentina 22.1, 5-63.
- RAMOS, V.A. (1993): Geología y estructura de Puente del Inca y el control tectónico de sus aguas termales. – XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas I°, 5, 8-19.
- RAMOS, V.A. (Hrsg., 1996): Geología de la Región del Aconcagua. Provincias de San Juan y Mendoza. – 510 S., Anales No 24, Subsecretaría de Minería de la Nación & Dirección Nacional del Servicio Geológico, Buenos Aires.
- RAMOS, V.A. (2000): The Southern Central Andes. – In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A. & Campos, D.A.: Tectonic Evolution of South America, 561-604, Río de Janeiro.
- RAMOS, V.A. (2009): Darwin at Puente del Inca: Observations on the formation of the Inca's bridge and mountain building. – Revista de la Asociación Geológica Argentina, 64, (1), 170-179.
- RAMOS, V.A.; CEGARRA, M. & CRISTALLINI, E.O. (1996): Cenozoic tectonics of the High Andes of west-central Argentina (30-36°S latitude). – Tectonophysics, 259, 185-200.
- RAMOS, V.A.; RIVANO, S.; AGUIRRE-URRETA, M.B.; GODOY, E. & LO FORTE, G.L. (1990): El Mesozoico del cordón del Límite entre Portozuelo Navarro y Monos de Agua (Chile-Argentina). – XI Congreso Geológico Argentino, Actas II: 43-46, San Juan.
- RAMOS, V.A.; ZAPATA, T.; CRISTALLINI, E. & INTROCASO, A. (2004): The Andean thrust system – Latitudinal variations in structural styles and orogenic shortening. – In: MCCLAY, K.R., ed., Thrust tectonics and hydrocarbon systems: AAPG Memoir, 82, 30-50.
- RAPELA, C.W. & LLAMBÍAS, E.J. (1999): El magmatismo gondwánico y los ciclos fanerozoicos. – En: Geología Argentina. Anales 29, (15), 373-376.
- REGAIRAZ, A.C. & ZAMBRANO, J.J., (1991): Unidades morfoestructurales y fenómenos neotectónicos en el norte de la provincia de mendoza (Andes Centrales argentinos entre 32°

y 34° de latitud sur). – In: GARLEFF, K. Y STINGL, H. (Hrsg.): *Südamerika. Geomorphologie und Palaoökologie im jüngeren Quartär*. Bamberger Geographische Schriften. 11, 1-21.

RIBACCHI, R.; GRAZIANI, A. & BOLDINI, D. (2002): *Previsione degli afflussi d'acqua in galleria e influenza sull'ambiente*. – *Meccanica e Ingegneria delle rocce*, 143-199.

RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ, L. R.; HEREDIA, N.; MARÍN, G.; QUESADA, C.; ROBADOR, A.; RAGONA, D. & CARDÓ, R. (1996): *Tectonoestratigrafía y estructura de los Andes Argentinos entre los 30° 30' y 31° 00' de latitud sur*. – XIII Congreso Geológico Argentino y III Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Acta II, 111-124.

ROETHER, W. (1967): *Estimating the tritium input to groundwater from wine samples: groundwater and direct run-off contribution to central European surface waters*. – Proc. IAEA Conf. on Isotope in Hydrology, IAEA, Vienna: 73-90.

SCHILLER, W. (1912): *La Alta Cordillera de San Juan y Mendoza y parte de la provincial de San Juan*. – *Anales del Ministerio de Agricultura, Sección Geología, Mineralogía y Minería*.

SCHNEIDER, J.F., ZOJER, H. & REICHL, P. (1999): *Die hydrogeologische Vorerkundung im Hohlraumbau*. – *Felsbau*, 16, (5), 276-283.

SCHOTTERER, U.; GROSJEAN, M.; STICHLER, W.; GINOT, P.; KULL, C.; BONNAVEIRA, H.; FRANCOU, B.; GÄGGELER, H.W.; GALLAIRE, R.; HOFFMANN, G.; POUYAUD, B.; RAMIREZ, E.; SCHWIKOWSKI, M. & TAUPIN, J.D. (2003): *Glaciers and climate in the Andes between the equator and 30° S: What is recorded under extreme environmental conditions?* – *Climatic Change*, 59, 157-175.

SCHOTTERER, U.; OLDFIELD, F. & FRÖHLICH, K. (1996): *GNIP Global Network for Isotopes in Precipitation*. – 48 S.

SCHROTT, L. (1994): *Die Solarstrahlung als steuernder Faktor im Geosystem der subtropischen semiariden Hochanden (Agua Negra, San Juan, Argentinien)*. – Diss. Univ. Heidelberg, Heidelberg Geogr. Arb., 94, 1-199.

SCHROTT, L. (2002): *Mountain permafrost hydrology and its relation to solar radiation. A case study in the Agua Negra catchment, High Andes of San Juan, Argentina*. – In: TROMBOTTO, D. & VILLALBA, R. (Hrsg.): *IANIGLA, 30 years of basic and applied research on environmental sciences*. Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales, Mendoza, 83-87. (auch auf Spanisch: *Hidrología del permafrost de montaña y su relación con la radiación solar. Estudio de una cuenca colectora en Agua Negra, Altos Andes de San Juan, Argentina*).

SMITH, L.P. (1937): *Heat flow in an infinite solid bounded internally by a cylinder*. – *J. Appl. Phys.*, 8, 441-448.

SOULEY, M.; HOMAND, F.; PEPA, S. & HOXHA, D. (2001): *Damage-induced permeability changes in granite: a case example at the URL in Canada*. – *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38, 297-310.

SPALLETTI, L.A.; QUERALT, I.; MATHEOS, S.D.; COLOMBO, F. & MAGGI, J. (2008): *Sedimentary petrology and geochemistry of siliciclastic rocks from the upper Jurassic Tordillo For-*

- mation (Neuquén Basin, western Argentina): Implications for provenance and tectonic setting. – *Journal of South American Earth Sciences*, 25, 440–463.
- SPRINGER, M. & FÖRSTER, A. (1998): Heat-flow density across the Central Andean subduction zone. – *Tectonophysics*, 291, 123-139, Elsevir.
- SPÖTL, C. & PAK, E. (1996): A strontium and sulfur isotopic study of Permo-Triassic evaporites in the Northern Calcareous Alps, Austria. – *Chem. Geol.*, 131, 219-234.
- STAPPENBECK, R. (1917): Geología de la falda oriental de la Cordillera del Plata. – *Anales N° 10.1 del Ministerio de Agricultura, Geología, Mineralogía y Minería*, Buenos Aires.
- STELZNER, A. (1923): Contribuciones a la geología de la República Argentina con la parte limítrofe de los Andes chilenos entre los 32° y 33°. – *Academia Nacional de Ciencias de Córdoba, Actas*, 8, 1-228.
- STRAYLE, G., STOBER, I. & SCHOLZ, W. (1994): Ergiebigkeitsuntersuchungen in Festgesteinen. – *Informationen 6, Geologisches Landesamt Baden-Württemberg*, 114 S. Freiburg im Breisgau.
- THORNTWAITE, C.W. (1948): An approach toward a rational classification of climate. - *The Geogr. Rev.*, 38, (1), 55-94.
- TURC, L. (1961): Évaluation des besoins en eau d'irrigation évapotranspiration potentielle. – *Ann Agron. Paris*, 12, 13-49.
- UYEDA, S. & WATANABE, T. (1982): Terrestrial heat flow in western South America. – *Tectonophysics*, 83, 63-70.
- VICENTE, J.-C. (1993): Andean tectonics and crustal shortening: The Andes of Aconcagua and their structure. – 2° International Symposium on Andean Geodynamics, 271-273, Oxford.
- VOGEL, J.C.; LERMAN, J.C.; MOOK, W.G. & ROBERTS, F.B. (1972): Natural isotopes in the groundwater of the Tulúm Valley, San Juan, Argentina. – *Hydrological Sciences – Bulletin des Sciences Hydrologiques*, 17, (1), 85-96.
- VOGEL, J.C.; LERMAN, J.C. & MOOK, W.G. (1975): Natural isotopes in surface and groundwater from Argentina. – *Hydrological Sciences – Bulletin des Sciences Hydrologiques*, 20, (2), 203-221.
- WEAVER, C. (1931): Paleontology of the Jurassic and Cretaceous of West Central Argentina. – *Univ. of Washington Mem.*, 1, 1-247.
- WENDLING, U. & MÜLLER, J. (1984): Entwicklung eines Verfahrens zur rechnerischen Abschätzung der Verdunstung im Winter. – *Z. Meteorol.*, 34, 82-85.
- YRIGOYEN, M. (1972): Cordillera Principal. – In: LEANZA, A. (Hrsg.): *Geología Regional Argentina*, Academia Nacional de Ciencias, 651-693, Córdoba.
- YRIGOYEN, M. (1993): Los depósitos sinorogénicos terciarios. – In: RAMOS, V.A. (Hrsg.): *Geología y Recursos Naturales de Mendoza. Velatorio del 12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos*, 123-148.

ZHANG, L. & FRANKLIN, J.A. (1993): Prediction of water flow into rock tunnels: an analytical solution assuming a hydraulic conductivity gradient. – *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics*, 30, 37-46.

7.2 Unveröffentlichte Quellen

BERTOU, X. (2011): ANDES: Agua Negra Deep Experiment Site – An underground laboratory in the Agua Negra tunnel – Estudio conceptual del laboratorio subterráneo ANDES. – Internal Document.

BÖFER, M. (2008): Rehabilitación del Ferrocarril Trasandino – Estudio de Factibilidad y Anteproyecto – Etapa I. Resumen Ejecutivo de Ingeniería. – Unveröff. Gutachten der Firmen GEOCONSULT – GRIMAUX – GEODATA für Corporación América S.A., Buenos Aires.

BÖFER, M. & HÖFER-ÖLLINGER, G. (2012): Túnel Trasandino Sobre Paso De Agua Negra – Vortrag, 3° Seminário Internacional “South American Tunnelling – SAT 2012”, São Paulo, Brasil.

BÖFER, M.; HÖFER-ÖLLINGER, G.; & FEGERL, L. (2008): Rehabilitación del Ferrocarril Trasandino – Estudio de Factibilidad y Anteproyecto – Etapa I. Informe Final Geológico – Geotécnico e Hidrogeológico. – Unveröff. Gutachten der Firmen GEOCONSULT – GRIMAUX – GEODATA für Corporación América S.A., Buenos Aires.

BRÜCKNER, F. (2010): Hydrogeologische Charakterisierung eines Störungssystems am Westhang des Cerro Olivares im Rahmen des Agua Negra Tunnelbauprojektes, Chile. – Unveröff. Bachelorarbeit, FUB, Berlin.

BUREAU DE PROYECTOS E CONSULTORÍA LTDA. (2012): Proyecto de Ingeniería Básica y Ejecución de Galería de Exploración del Túnel de Agua Negra y sus Accesos. Quebrada de San Lorenzo – Llano de las Liebres. – San Juan (República Argentina) – Elqui (República de Chile).

CONSULBAIRES & INGENDESA (2004): Estudio de Prefactibilidad Técnica para definir las Obras necesarias en la zona limítrofe del Paso Agua Negra, IV Región – Provincia de San Juan. – Unveröff. Gutachten Provinz San Juan.

ELISSONDO, M. (2006): Geomorfología de la quebrada del Agua Negra, provincia de San Juan. – SEGEMAR, Buenos Aires, Argentina.

GATTINONI, P.; SCESI, L. & TERRANA, S. (2010): Tunnel inflow assessment in discontinuous rock masses: from numerical modeling to empirical equations. – Politecnico di Milano.

HÖFER-ÖLLINGER, C.G. (2008): Estudio topografico preliminar y desarrollo de mapeo geológico-geotécnico e hidrogeológico para posible ubicación túnel internacional ruta nacional 150. Informe definitivo. – Gutachten der Firmen De La Torre y Asociados und GEOCONSULT, erstellt im Auftrag der Regierung von San Juan, Argentinien.

HÖFER-ÖLLINGER, C.G. (2010): Profundización del Conocimiento de las condiciones geológicas desde la entrega del Estudio de Factibilidad del verano 2008. – Vortrag, gehalten bei Corporación América im Mai 2010 in Buenos Aires.

HÖFER-ÖLLINGER, C.G. (2011): Einsatz von Isotopenmethoden bei der Vorerkundung von Tunnelprojekten. – Vortrag, Festkolloquium 40 Jahre ANIP, Wien.

HÖFER-ÖLLINGER, C.G. & MILLEN, B.M.J. (2013): Stable isotope relationships of groundwater and runoff at high altitudes – a case study from the Andean Cordillera, Chile/Argentina. – Abstract und Poster am 12th Stable Isotope Network Austria (SINA) Meeting, Graz.

HÖFER-ÖLLINGER, C.G.; BÖFER, M.; MILLEN, B.M.J.; PUMBERGER, W.; WIESELTHALER, F. (2010): Supervisión de sondeos y ensayos en perforaciones – informe interpretativo etapas I y II. – Gutachten der Firmen De La Torre y Asociados und GEOCONSULT, erstellt im Auftrag der Regierung von San Juan, Argentinien.

HÖFER-ÖLLINGER, C.G.; MILLEN, B.M.J.; FEGERL, L.; HEIMLICH, K., UTTINI, A. & VENDRAMINI, M. (2008): Rehabilitación del Ferrocarril Trasandino – Estudio de Factibilidad y Anteproyecto – Etapa I. Informe geológico preliminar. – Unveröff. Gutachten der Firmen GEOCONSULT – GRIMAUX – GEODATA für Corporación América S.A., Buenos Aires.

Marini, L. (2000): Geochemical techniques for the exploration and exploitation of geothermal energy. – 82 S., Università degli Studi di Genova.

MILLEN, B.M.J., SPÖTL, C. & BURGER, U. (2002): Using Sulphur-34 Analyses in Applied Hydrogeology. Examples from the Northern Calcareous Alps, Austria. – Vortrag, PANGEO 2002, Salzburg.

ÖSTERREICHISCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOMECHANIK (2008): Richtlinie für geotechnische Planung von Untertagebauten mit zyklischem Vortrieb. – 43 S., Salzburg.

ÖSTERREICHISCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOMECHANIK (2012): Tiefliegende Tunnel – Arbeitsbericht 2012 – Kapitel 3 Gebirgsmodell – Kapitel 4 Gebirgsverhalten. – Unveröff. Arbeitsbericht, 24 S., Salzburg.

SCHMID, S. (2013): Strukturgeologie und Tektonik im Bereich des Agua Negra Passes – San Juan, Argentinien, und deren ingenieurgeologische Auswirkungen. – Unveröff. Dipl.-Arb., Karl-Franzens-Universität Graz und Technische Universität Graz.

SCHMID, S.; KURZ, W. & HÖFER-ÖLLINGER, C.G. (2012): Strukturgeologie und Tektonik im Bereich des Agua Negra Passes, San Juan, Argentinien. – Vortrag, PANGEO 2012, Salzburg.

SCHOTTE, B. (2011): Hydrogeologische Erkundung des geplanten andinen Basistunnels Punta de Vacas (Argentinien) – Rio Blanco (Chile). – Unveröff. Dipl.-Arb. Freie Universität Berlin, 170 S.

Anhang

Anhang 1. Aufgenommene Quellen und Oberflächengewässer, Tunnel Agua Negra

Nr.	Art	Datum	Leitfähigkeit ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)	pH	Wassertyp
001	Quelle	30.01.2008	75,4	0,9	6,9	Ca-Na-HCO ₃
002	Quelle	30.01.2008	81	1,0	7,1	Ca-Na-HCO ₃ -SO ₄
003	Quelle	30.01.2008	110,9	0,6	7,4	Ca-Na-HCO ₃
004	Quelle	30.01.2008	114,4	2,8	7,3	Ca-Na-HCO ₃
005	Quelle	30.01.2008	111,8	3,6	7,3	Ca-Na-HCO ₃
006	Quelle	30.01.2008	207	10,3	7,1	Na-Ca-HCO ₃ -SO ₄
007	Quelle	30.01.2008	203	19,2	7,3	Ca-Na-Mg-HCO ₃
008	Quelle	30.01.2008	253	16,2	7,6	Ca-Na-SO ₄ -HCO ₃
009	Quelle	30.01.2008	172,7	6,6	7,6	Na-Ca-HCO ₃ -SO ₄
010	Quelle	30.01.2008	216	11,4	7,6	Na-Ca-HCO ₃ -SO ₄
011	Quelle	30.01.2008	1185	17,9	7,8	Na-HCO ₃ -SO ₄
012	Quelle	30.01.2008	89,4	2,5	7,3	Ca-Na-HCO ₃
013	Quelle	30.01.2008	92,9	0,4	7,2	Ca-Na-HCO ₃ -SO ₄
014	Quelle	31.01.2008	815	4,7	7,3	Ca-Mg-SO ₄
015	Quelle	31.01.2008	582	4,2	5,3	Ca-SO ₄
016	Quelle	31.01.2008	950	8,0	7,7	Ca-SO ₄
017	Quelle	31.01.2008	845	5,1	7,6	Ca-SO ₄
018	Quelle	31.01.2008	916	11,3	7,8	Ca-SO ₄
019	Quelle	31.01.2008	478	3,6	7,2	Ca-SO ₄
020	Quelle	31.01.2008	989	4,6	7,5	Ca-Mg-SO ₄
021	Quelle	31.01.2008	831	10,7	7,7	Ca-Mg-SO ₄
022	Quelle	31.01.2008	642	6,2	7,7	Ca-Mg-SO ₄ -HCO ₃
023	Quelle	31.01.2008	283	9,6	7,3	Ca-SO ₄ -HCO ₃
024	Quelle	31.01.2008	227	12,9	7,6	Ca-Mg-SO ₄ -HCO ₃
025	Quelle	31.01.2008	176,3	9,1	7,7	Ca-SO ₄ -HCO ₃
026	Quelle	31.01.2008	111,9	6,2	7,3	Ca-HCO ₃ -SO ₄
027	Quelle	31.01.2008	294	8,6	6,9	Ca-SO ₄ -HCO ₃
028	Quelle	31.01.2008	205	9,2	7,3	Ca-SO ₄ -HCO ₃
029	Quelle	31.01.2008	160,8	9,5	7,4	Ca-HCO ₃ -SO ₄
030	Quelle	31.01.2008	78,9	6,1	7,3	Ca-Na-HCO ₃ -SO ₄
031	Quelle	01.02.2008	1628	1,3	7,7	Ca-Mg-SO ₄
032	Bach	01.02.2008	583	0,1	4,6	Ca-Mg-SO ₄
033	Quelle	01.02.2008	332	5,7	7,4	Ca-SO ₄ -HCO ₃

034	Quelle	01.02.2008	332	5,7	7,6	Ca-Mg-SO ₄
035	Quelle	01.02.2008	1836	1,3	5,1	Ca-Mg-SO ₄
036	Quelle	01.02.2008	399	0,1	7,5	Ca-SO ₄
037	Quelle	01.02.2008	276	4,6	7,4	Ca-Mg-SO ₄ -HCO ₃
038	Bach	01.02.2008	136,3	3,7	7,4	Ca-HCO ₃ -SO ₄
039	Quelle	01.02.2008	96,9	3,6	7,3	Ca-HCO ₃
040	Quelle	01.02.2008	95,6	5,2	7,5	Ca-HCO ₃
041	Bach	01.02.2008	478	7,3	7,7	Ca-Mg-SO ₄ -HCO ₃
A001	Bach	05.02.2009	235	10,5	7,2	Ca-Na-HCO ₃
A002	Bach	03.06.2009	193,3	0,1	6,9	Ca-Na-HCO ₃ -SO ₄
A003	Bach	03.06.2009	236	1,5	7,0	Ca-Na-HCO ₃ -SO ₄
A004	Bach	03.06.2009	380	11,9	7,4	Na-Ca-Mg-SO ₄ -HCO ₃
A040	S-02 Abhang	17-02.2009	108,5	4,2	6,7	Ca-Na-HCO ₃

Anhang 2. Parameter der in den Bohrungen angetroffenen Wässer, Tunnel Agua Negra

Nr.	Bohr	Datum	Leitfähigkeit ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)	pH	Wassertyp
A005	S-03	05.06.2009	427*		7,1	Na-K-HCO ₃
A006	S-03	05.06.2009	918*		7,8	Na-Ca-Mg-HCO ₃
A007	S-03	07.06.2009	352	3,7	7,1	Na-Ca-Mg-HCO ₃
A008	S-03	07.06.2009	891	5,7	7,0	Na-Ca-Mg-HCO ₃
A009	S-04	17.05.2009	2280	5,3	6,3	Ca-Mg-Na-SO ₄
A010	S-04	17.05.2009	2160	4,9	7,2	Ca-Mg-Na-SO ₄
A011	S-04	24.05.2009	2394	4,7	7,0	Ca-Mg-Na-SO ₄
A012	S-04	24.05.2009	2400	5,1	7,2	Ca-Mg-Na-SO ₄
A013	S-04	24.05.2009	2460	4,9	6,8	Ca-Mg-Na-SO ₄
A014	S-04	24.05.2009	2433	4,6	6,8	
A014	S-04	24.05.2009	2460	4,8	7,0	
A016	S-04	24.05.2009	1513	4,9	7,0	Ca-Mg-Na-SO ₄
A017	S-04	26.05.2009	2340*		6,9	Ca-Mg-Na-SO ₄
A018	S-04	26.05.2009	2300*		6,8	Ca-Mg-Na-SO ₄
A019	S-04	10.06.2009	2480*		6,2	Ca-Mg-Na-SO ₄
A020	S-04	10.06.2009	2380*		6,1	Ca-Mg-Na-SO ₄
A021	S-04	--	2290*		6,7	Ca-Mg-Na-SO ₄
A022	S-05	30.04.2009	330*		7,1	Ca-Na-SO ₄ -HCO ₃ -Cl
A023	S-05	30.04.2009	1950*		7,2	Mg-Ca-Na-SO ₄
A024	S-05	02.05.2009	2120	7,2	7,6	Mg-Ca-Na-SO ₄
A025	S-05	04.05.2009	1666	8,5	7,4	Ca-Na-Mg-SO ₄

A026	S-05	05.05.2009	2369	4,9	7,6	Ca-Mg-Na-SO ₄
A027	S-05	--	3234	5,5	7,5	Mg-Ca-SO ₄
A028	S-06	30.04.2009	1650*		7,6	Ca-Na-Mg-SO ₄
A029	S-07	04.06.2009	576	4,3	7,1	Na-Ca-SO ₄
A030	S-07	04.06.2009	523	7,6	7,3	Na-Ca-SO ₄
A031	S-07	04.06.2009	542*		7,0	
A032	S-07	04.06.2009	563	2,9	7,3	
A033	S-07	04.06.2009	502*		7,1	Ca-Na-Mg-SO ₄ -HCO ₃
A034	S-07	05.06.2009	462	4,3	7,2	Ca-Na-SO ₄ -HCO ₃
A035	S-07	05.06.2009	456*		7,1	
A036	S-07	08.06.2009	430	3,7	7,1	Ca-Na-Mg-SO ₄ -HCO ₃
A037	S-07	10.06.2009	392*		7,2	
A038	S-07	11.06.2009	403*		7,2	
A039	S-07	12.06.2009	389*		7,2	Ca-Na-Mg-SO ₄ -HCO ₃

Anmerkung: die mit * gekennzeichneten Leitfähigkeiten und pH-Werte wurden im Labor gemessen. Bei den Proben, die nicht vollständig chemisch untersucht wurden, ist das Feld "Wassertyp" freigelassen.

Anhang 3. Hydrochemischer Befund der Quellen und Oberflächengewässer, Tunnel Agua Negra

Werte in [mg/l], auf Basis der Befunde von LAQUI (Laboratorio Quimico Integral, San Juan, die ersten Befunde ohne Nummer), sowie INA CRAS (Instituto Nacional del Agua, Centro Regional de Agua Subterránea, Proben 001 bis 041 sowie alle A0...).

Nr.	Art	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ³⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
-	Quelle	265	72	10.4	1	64.7	722	37.3	0
-	Bach gelb	181	50	3.2	0.5	46	675	37.3	0
001		11	1.1	3.8	0.3	39	7.4	1.9	4
002		10	1.4	4	0.3	34	9.9	2.2	4.9
003		14	1.6	6.3	0.2	43	9.9	5.2	7.5
004		14	1.9	6.5	0.5	45	9.9	5.6	10
005		14	1.7	6.3	0.5	47	9.9	4.1	8.9
006		14	3.6	25	0.7	84	21	8.9	2.2
007		20	5.3	18	0.6	113	13	5.6	
008		26	5.2	17	0.6	50	72	5.6	5.3
009		16	4.3	19	0.6	81	24	5.6	2.2
010		17	4.2	28	0.6	103	24	7.4	3.5
011		16	8.9	270	4	458	165	71	
012		12	1.3	6.5	0.6	41	9.1	3.7	4.9
013		14	1.2	5	0.3	39	16	1.9	3.5
014		115	27	22	0.6	75	369	3.7	0.4

015		92	11	20	0.9	2.1	304	3.7	
016		167	27	33	0.7	86	506	3.7	
017		146	16	12	0.6	79	379	3	0.9
018		178	17	14	0.4	103	437	7.4	
019		73	12	11	0.5	53	201	3.7	2.7
020		162	29	17	0.7	34	516	3.7	1.3
021		136	24	11	0.7	75	389	3.7	0.9
022		89	19	8.2	0.6	88	236	3.7	1.3
023		41	6.3	10	0.5	70	88	3.7	1.8
024		34	6.4	7	0.5	56	79	1.9	0.9
025		26	4.1	6	0.5	49	49	3	1.8
026		17	2	5	0.4	48	18	3.7	3.5
027		45	7.2	5.5	0.5	61	94	3.3	2.7
028		29	3.2	6.5	0.5	51	54	3.7	3.5
029		24	2.1	6	0.4	54	35	3.3	2.2
030		12	1.3	5	0.2	41	9.9	3	2.2
031		254	73	45	1.3	161	856	5.6	
032		82	17	17	0.6	0.4	297	3.7	2.7
033		54	6	10	0.3	53	135	3.7	
034		65	13	10	0.5	57	181	3.7	3.5
035		285	61	25	0.6	3.9	1060	9.3	0.9
036		65	6.5	8.5	0.4	49	161	3.7	0.9
037		35	7.1	10	0.4	57	85	3.7	1.8
038		17	3	5.5	0.5	49	22	3.7	6.2
039		13	1.8	4.5	0.6	53	4.9	3.3	2.2
040		14	1.6	4.5	0.6	51	2.5	3.3	1.8
041		74	13	10	0.6	64	196	3.7	2.7
A001		25	5.3	22	6.8	132	19	5.4	2.2
A002		19	3.3	15	6.4	62	25	9.1	7.1
A003		24	4.4	12	6	69	37	3.6	4.4
A004		27	14	32	7	98	96	6.8	4.9
A040		18	3.1	10	3	64	13	4.5	8.4

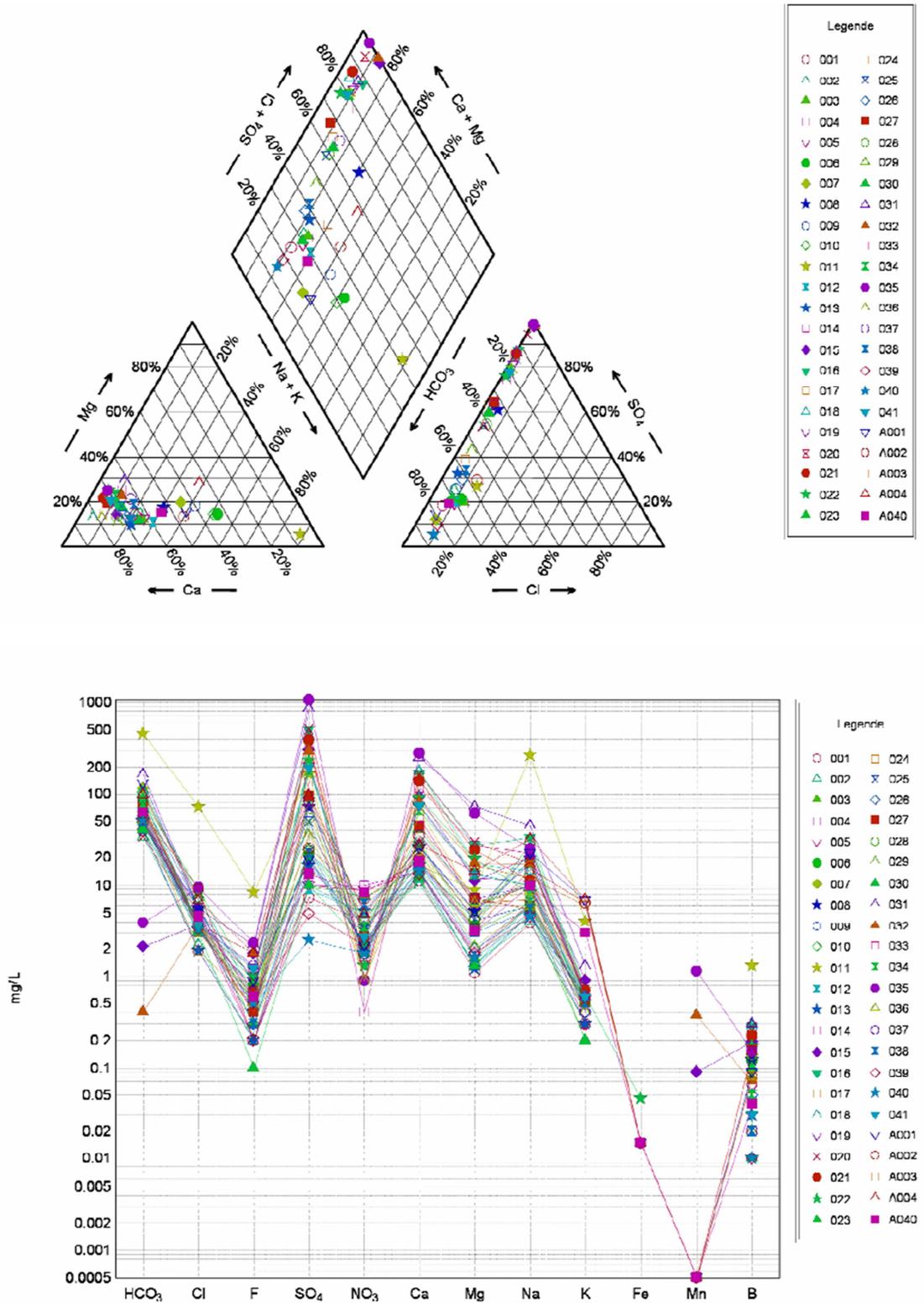


Abbildung i. Piper- (oben) und Schöllerplot (unten), prozentuelle Anteile beziehungsweise Konzentrationen der Ionen in den Wasserproben aus dem Projektgebiet.

Anhang 4. Hydrochemischer Befund der aus Bohrungen geförderten Wässer, Tunnel Agua Negra

Werte in [mg/l], auf Basis der Befunde von INA CRAS (Instituto Nacional del Agua, Centro Regional de Agua Subterránea).

Nr.	Bohrung	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ³⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
A005	S-03	23	8.2	58	75	183	33	24	10
A006	S-03	61	33	81	7.8	395	112	18	15
A007	S-03	22	13	38	6.5	187	30	7.2	4.4
A008	S-03	54	29	80	7.8	388	72	17	17
A009	S-04	300	120	220	11	47	1600	9.1	0
A010	S-04	284	110	205	11	85	1480	4.5	0
A011	S-04	275	115	205	9.9	108	1460	7.2	0
A012	S-04	284	120	200	8.8	116	1480	9.1	0
A013	S-04	285	129	190	8	91	1490	5.4	0
A016	S-04	282	127	190	8.1	115	1480	7.2	0
A017	S-04	298	133	205	8.6	127	1550	9.1	0
A018	S-04	292	120	205	8.8	92	1540	4.5	0
A019	S-04	313	132	210	8.6	69	1660	9.1	0.4
A020	S-04	310	115	210	8.6	46	1610	12	0.4
A021	S-04	284	123	220	8.5	84	1560	9.1	0
A022	S-05	24	5.9	50	2.1	76	75	31	3.1
A023	S-05	144	130	155	7.7	274	953	23	10
A024	S-05	214	154	160	7.8	303	1200	18	12
A025	S-05	224	83	160	6.6	206	1030	15	15
A026	S-05	233	133	155	7.5	278	1150	18	11
A027	S-05	291	215	165	7.7	340	1610	14	10
A028	S-06	247	51	105	8.8	214	845	9.1	11
A029	S-07	44	8.7	64	5.5	88	189	14	6.6
A030	S-07	46	10	58	5	91	186	13	4.9
A033	S-07	46	14	45	5	78	185	9.1	6.2
A034	S-07	44	11	40	3.2	71	163	7.2	5.8
A036	S-07	41	11	35	3	80	146	5.4	5.3
A039	S-07	40	9.9	26	3	75	125	3.6	5.8

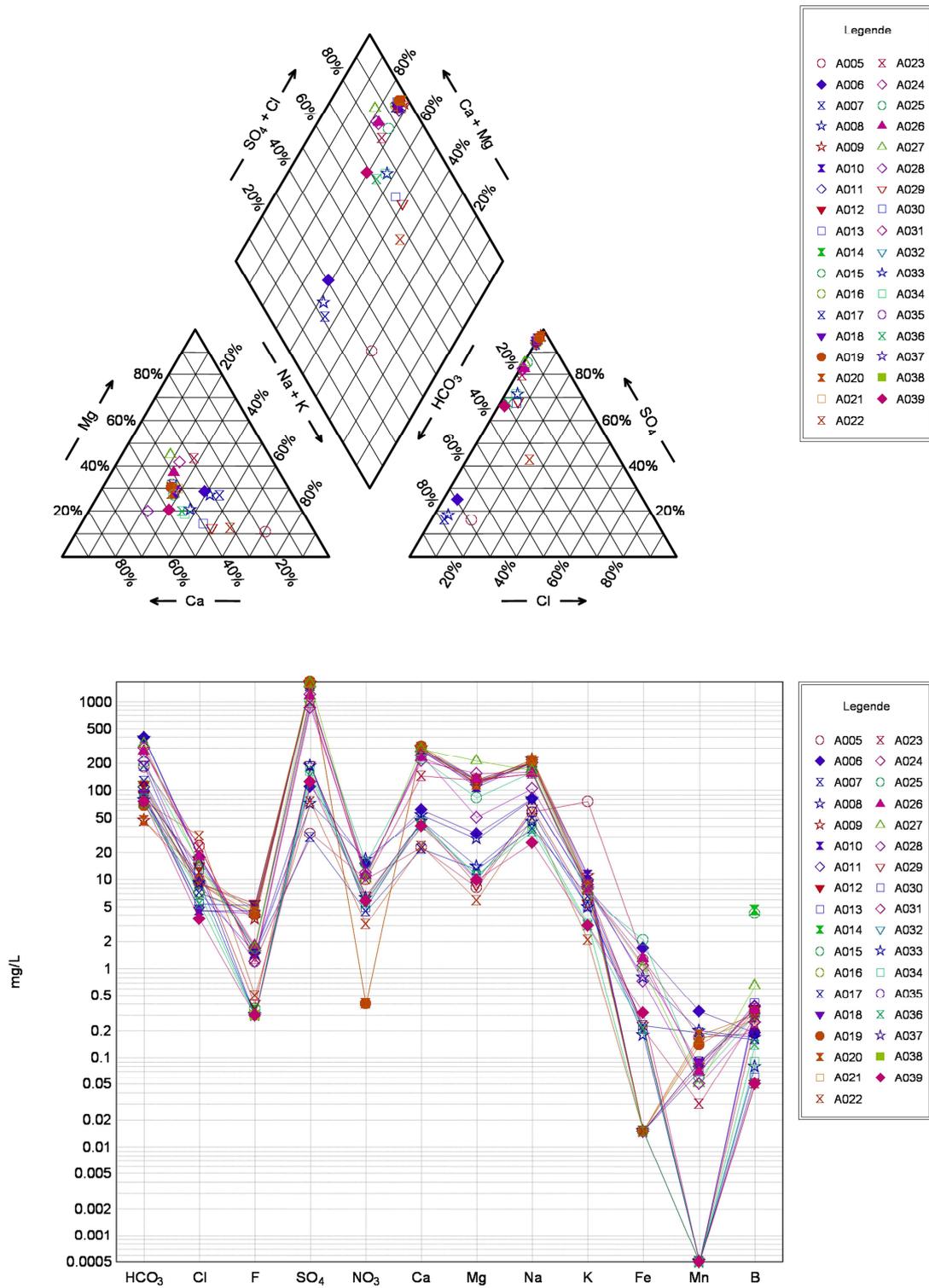


Abbildung ii. Piper- (oben) und Schöllerplot (unten), prozentuelle Anteile beziehungsweise Konzentrationen der Ionen in den Wasserproben aus dem Projektgebiet (Siehe dazu auch Anhang 2).

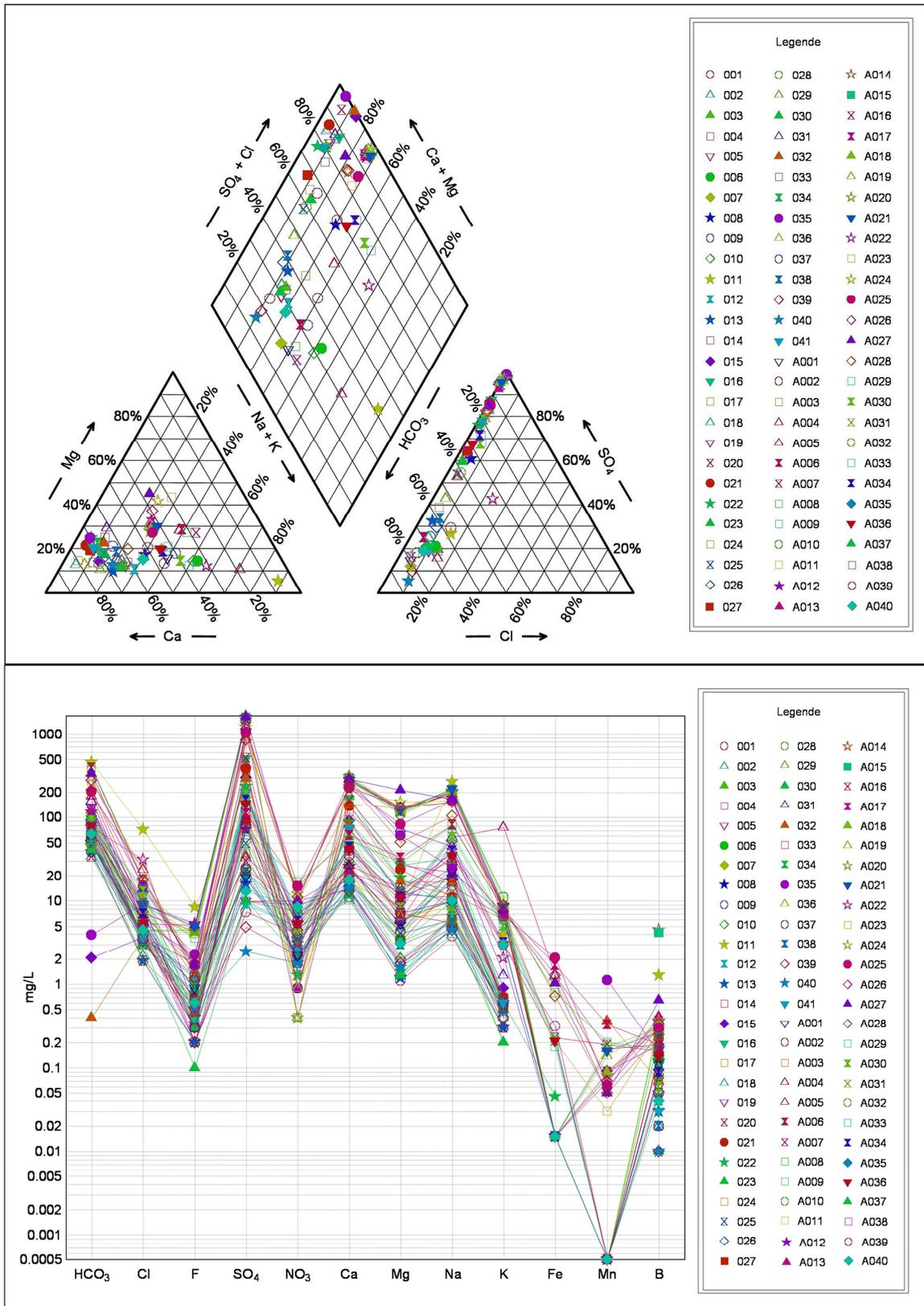


Abbildung iii. Piper- (oben) und Schöllerplot (unten) aller untersuchten Wasserproben im Projektgebiet.

Anhang 5. Isotopenanalysen

Isotopenanalytik der im Bereich des Agua Negra Pass an der Oberfläche gezogenen Proben an Quellen und Bächen. Werte in [‰] des SMOW.

Nr.	Art	Höhe ¹	Höhe ²	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	Bemerkung
1	Quelle	4050	4175	-17,040	-130,622	Tümpelquelle bei Ruta 150
2	Quelle	4070	4440	-18,292	-139,038	Quelle unter Rutschung
3	Quelle	4000	4400	-18,199	-140,774	Sodaquelle westlich Passhöhe
4	Quelle	3700	4300	-17,640	-135,879	Quelle bei chilenischem Portal
5	Bach	3700	4360	-17,921	-138,729	Gerinne bei chilenischem Portal
6	Bach	4030	4320	-17,666	-133,644	Gletscherabfluss El Tapado
7	Quelle	4230	4400	-18,224	-138,631	Quelle NW' Agua Negra Pass
8	Quelle	4640	4900	-20,985	-154,174	Blockgletscherquelle Sarmiento
9	Quelle	4310	4250	-17,223	-131,140	Blockgletscherquelle Felssturz
10	Bach	4320	4650	-19,559	-145,523	Bach Quebrada San Lorenzo
11	Bach	4180	4600	-19,317	-145,117	Bach Quebrada Amarilla
12	Quelle	4160	4500	-18,675	-142,071	Quelle Quebrada Amarilla

¹ Absolute Höhe der Probenahmestelle, in [m].

² Durchschnittliches Einzugsgebiet (geschätzt), [m].

Isotopenanalytik der im Bereich des Agua Negra Passes im Zuge von Pumpversuchen gezogenen Proben, Werte in [‰] des SMOW.

Nr.	Datum	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	Bemerkung
M1a SO1A	16.03.2010	-17,625	-128,519	Unmittelbar nach Förderbeginn
M2a SO1A	16.03.2010	-17,113	-126,295	ca.40 m Absenkung, keine Beharrung
M4a SO1A	16.03.2010	-16,964	-125,510	Ende 2. Pumpstufe, Beharrung
M5a SO1A	16.03.2010	-16,757	-124,703	Dritte Pumpstufe, +/- Beharrung
M1 S10	17.04.2010	-17,513	-129,997	Unmittelbar nach Förderbeginn
M3 S10	17.04.2010	-17,540	-130,476	Beharrung in erster Pumpstufe
M5 S10	17.04.2010	-17,474	-130,202	Zweite Pumpstufe
M7 S10	17.04.2010	-17,085	-128,295	Ende der dritten Pumpstufe
M1 S10	06.05.2010	-17,640	-132,484	Erste Pumpstufe
M3 S10	06.05.2010	-17,769	-133,527	Beginn zweite Pumpstufe
M5 S10	06.05.2010	-17,005	-127,654	Mitte zweiter Pumpstufe
M7 S10	06.05.2010	-17,079	-127,646	Beginn dritte Pumpstufe
M9 S10	06.05.2010	-17,035	-127,543	Ende der dritten Pumpstufe

Anhang 6. Annahmen für eine instationäre Tunnelprognose des Agua Negra Tunnels

Abschnitt – Variable (von chilenischem Portal aus)	Geotechn. Zone	Überlagerung	Vortriebsgeschwindigkeit	k_f [m/s]	S
0,010 - 0,090 km	1	bis 45 m	320 m/a	1 E-08	1 E-06
0,090 - 0,840 km	2	bis 420 m	1080 m/a	5 E-08	1 E-05
0,840 - 1,490 km	3	bis 745 m	1920 m/a	1 E-08	1 E-06
1,490 - 2,590 km	4	bis 1.295 m	1920 m/a	1 E-08	1 E-06
2,590 - 2,840 km	5	bis 1.420 m	1080 m/a	1 E-07	1 E-05
2,840 - 5,290 km	6	bis 1.750 m	1080 m/a	3 E-09	1 E-06
5,290 - 5,490 km	7	bis 1.430 m	1080 m/a	1 E-07	1 E-05
5,490 - 6,890 km	8	bis 1.430 m	1080 m/a	1 E-08	1 E-06
6,890 - 7,090 km	9	bis 890 m	1080 m/a	1 E-08	1 E-06
7,090 - 7,290 km		bis 850 m		3 E-07	5 E-05
7,290 - 7,390 km		bis 810 m		1 E-08	1 E-06
7,390 - 8,090 km	10	bis 1.000 m	1080 m/a	1 E-08	1 E-06
8,090 - 8,690 km	11	bis 770 m	1920 m/a	1 E-08	1 E-06
8,690 - 8,990 km	12	bis 600 m	1080 m/a	1 E-08	1 E-06
8,990 - 9,600 km	13	bis 540 m	1080 m/a	1 E-08	1 E-06
9,600 - 11,250 km	14	bis 530 m	1920 m/a	5 E-08	1 E-05
11,250 - 11,790 km	15	bis 330 m	1080 m/a	1 E-08	1 E-06
11,790 - 12,900 km	16	bis 340 m	1920 m/a	1 E-08	1 E-06
12,900 - 13,390 km	17	bis 260 m	1080 m/a	5 E-08	1 E-05
13,390 - 13,790 km	18	bis 140 m	1920 m/a	3 E-08	1 E-06
13,790 - 13,850 km	19	bis 15 m	320 m/a	3 E-08	1 E-06

Anhang 7. Gewichtung der Einflussfaktoren beim geothermischen Modell des Agua Negra Tunnels

Faktor	Agua Negra Tunnel
Leitfähigkeit der Gesteine [W/m/K]	Rhyolite: ~ 3 Dazit: 2,7 Basalt: 2,3
Geothermischer Gradient [°C/km]	30 bis 35
Wärmefluss [mW/m ²]	~ 100
Einfluss Temperatur, Druck auf Leitfähigkeit	irrelevant
Änderung der Temperatur	nicht berücksichtigt
Senke	~ -5 bis 7°C
Hydrogeologie	größtenteils irrelevant, in Prognose wegen vernachlässigbarer Ergiebigkeit nicht berücksichtigt
Geomorphologie	relevant, Effekt der Glättung gemäß Jaboyedoff (1999)
(Maximale Überlagerung)	(bis 1.750 m)
Radioaktiver Zerfall	mäßig relevant
Permafrost	stark relevant
Erhöhte Solarstrahlung	stark relevant

Anhang 8. Auswertung der Bohrung für das geothermische Modell des Agua Negra Tunnels

Bez.	GOK [m]	interp. T. an GOK [°C]	Permafrost (j = ja, n = nein)	Gradient korrigiert [°C/km]	Lithologie, von-bis, therm. Leitf. [W/m/K]; Maßgebliche Zerlegung (Abzug in Prozent)	Therm. Leitf. [W/m/K]	Wärme-fluss [mW/m²]
S01	3635	7	n	43,35	Kies trocken 000-038 1,5 Rhyolit 038-420 3,1 Faktor Zerlegung 10	3,0-10% = 2,7	117
S02	4297	3,5	SCHROTT (1994): j Abbildung 30: n	34,9	Kies gesätt. 000-070 2,1 Rhyolit 070-111 3,1 Dacit 111-134 2,7 Rhyolit 134-177 3,1 Dacit 177-357 2,7 Andesit 357-443 3,1 Dacit 443-530 2,7	2,75	96
S03	4444	1	SCHROTT (1994): j Abbildung 30: n	34,3	Kies gesätt. 000-026 2,1 Rhyolit 026-053 3,1 Dacit 053-136 2,7 Rhyolit 136-285 3,1 Dacit 285-330 2,7 Rhyolit 330-476 3,1 Dacit 476-515 2,7 Rhyolit 515-600 3,1	2,95	101
S04	4245	3	SCHROTT (1994): j Abbildung 30: n	28,1	Kies trocken 000-024 1,5 Rhyolit 024-320 3,1	3,0	84
S05	4245	5	SCHROTT (1994): j Abbildung 30: n	25,1	Rhyolit 000-116 3,1 Dacit 116-183 2,7 Rhyolit 183-320 3,1	3,0	75
S08	4460	-0,5	SCHROTT (1994): j Abbildung 30: j	36,0	Kies trocken 000-059 1,5 Rhyolit 059-566 3,1 Basalt, Dacit 566-620 2,5 Rhyolit 620-630 3,1	2,9	104
S10	3653	6	n	51,45	Rhyolit 000-320 3,1 Faktor Zerlegung 10	3,1-10%: 2,8	144

Anhang 9. Gesteine, zugeordnet zu entsprechenden Formationen, des Basistunnels des Corredor Bioceánico Aconcagua.

Geologische Formation	Gesteinstyp
Präjurassisches Basement	
Formation Alto Tupungato	Wechsellagerung von Tonsteinen und Sandsteinen; homogene Grauwacken
Permische Granodiorite	Granite, Granitoide
Formation Choiyoi	Rhyolithe, Ignimbrite, Tuffe
Mesozoische Gesteine	
Formation La Manga	Konglomerate und lithische, Q-hältige Sandsteine; mittel- bis grobkörnige, Kalksandsteine; Kalkstein, mit teils brekziöser Ausführung (periodische Verkarstungen)
Formation Auquilco / Yeso Principal	Evaporitische Ablagerungen (Gips, Anhydrit) mit Einschaltungen von Tonsteinen und Kalktonsteinen.
Formation Tordillo	Laven und porphyrische Körper, zusammengesetzt aus Basandesiten und augitischen Andesiten; Einschaltungen von andesitischen Vulkanoklastika; Grob- bis mittelkörnige Sandsteine; Konglomerate
Gruppe Mendoza (Formationen Vaca Muerta, Quintuco, Mulichinco, Agrio)	Tonsteine; Kalktonsteine; Sandsteine; feinkörnige Sandsteine; Konglomerate; vulkanische Brekzien; Tuffe; Kalksteine; Evaporite
Formation Cristo Retendor / Diamante	Fein- bis grobkörnige Sandsteine; feinkörnige Konglomerate vulkanischer Herkunft; andesitische Ganggesteine; kalkige Lagen
Formation Juncal	Brekzien und vulkanische Agglomerate; Laven und Ganggesteine mit andesitischer, hornblendereicher und dazitischer Zusammensetzung; Andesite und Basalte; feinkörnige Sandsteine; Kalksteine
Formation Agua de la Piedra	Konglomerate, Fanglomerate
Formation Farrellones	Andesitische Brekzien, Agglomerate und Tuffe, mit Einschaltungen von andesitischen und dazitischen Laven
Tertiäre Gesteine	
Tertiäre Intrusivgesteine	Dazit; Diorit; Granodiorit
Quartäre Gesteine	
Quartäre Ablagerungen	Glazigene Sedimente; Ablagerungen von Massenbewegungen; Alluvium und Colluvium

Anhang 10. Aufgenommene Quellen und Oberflächengewässer, Corredor Bioceánico Aconcagua

Nummer	Datum	Schüttung (l/s)	El. Leitfähigkeit (µS/cm)	Temperatur (°C)	pH	Chemismus	Dom.
001	20/2/2008	<1	3050	9,9	7,27	Ca-SO4-Cl	1
002	20/2/2008	4-6	3000	3,6	7,26	Ca-SO4	1
003	21/2/2008	30-40	2930	3,6	7,12	Ca-SO4	1
004	21/2/2008	0,5	2820	9,1	6,96	Ca-SO4	1
005	21/2/2008	10	2990	5,6	7,17	Ca-SO4-Cl	1
006	21/2/2008	5	2660	5,7	7,31	Ca-SO4	1
007	21/2/2008	10-20	2410	13,2	8,02	Ca-SO4	1
016	24/2/2008	6-8	21900	35,0	6,22	Na-Ca-Cl	1
037	02/3/2008	<1	327	10,6	7,95	Ca-HCO3	1
039	02/3/2008	8-10	862	7,9	7,60	Ca-Na-SO4-HCO3	1
040	02/3/2008	3-5	793	8,5	7,58	Ca-Na-SO4-HCO3	1
048	04/3/2008	2-4	2460	3,3	7,10	Ca-SO4	1
049	04/3/2008	8-10	1902	3,7	7,14	Ca-SO4	1
050	04/3/2008	4	3030	4,2	6,88	Ca-SO4	1
051	04/3/2008	2-4	3070	3,6	7,07	Ca-SO4	1
052	04/3/2008	8-10	3100	3,6	7,07	Ca-SO4	1
053	04/3/2008	25-30	3080	3,6	7,05	Ca-SO4	1
054	04/3/2008	15	3100	3,7	7,19	Ca-SO4	1
055	05/3/2008	<1	2280	4,5	7,07	Ca-SO4	1
060	05/3/2008	6-8	4370	9,7	6,98	Ca-Na-SO4-Cl	1
023	28/2/2008	6-8	821	9,9	7,36	Ca-SO4-HCO3	2
025	28/2/2008	1-2	580	4,1	7,64	Ca-SO4	2
026	24/2/2008	2-4	645	6,7	7,68	Ca-SO4	2
027	24/2/2008	6-8	687	4,3	7,73	Ca-SO4	2
028	28/2/2008	6-8	686	4,2	7,74	Ca-SO4	2
029	28/2/2008	6-8	686	4,2	8,11	Ca-SO4	2
030	28/2/2008	2-4	626	8,4	7,99	Ca-SO4	2
047	04/3/2008	>50	1617	3,0	7,49	Ca-SO4	2
056	05/3/2008	6-8	968	8,2	8,19	Ca-SO4	2
057	05/3/2008	8-10	1613	6,7	7,50	Ca-SO4	2
058	05/3/2008	4-6	1515	7,1	7,58	Ca-SO4	2
059	05/3/2008	10-12	1487	7,3	7,68	Ca-SO4	2
008	22/2/2008	4-6	190	0,9	8,50	Ca-Mg-HCO3-SO4	3
009	22/2/2008	2-4	117	4,9	7,61	Ca-Mg-HCO3	3

011	23/2/2008	6-8	108	1,8	8,70	Ca-Mg-HCO ₃	3
012	23/2/2008	6-8	112	1,7	8,69	Ca-Mg-HCO ₃	3
013	23/2/2008	4-6	113	1,7	8,66	Ca-Mg-HCO ₃	3
014	23/2/2008	2-3	119	2,9	7,97	Ca-Mg-HCO ₃	3
015	23/2/2008	2-3	118	3,4	7,88	Ca-Mg-HCO ₃	3
024	28/2/2008	12-14	330	2,8	8,16	Ca-SO ₄ -HCO ₃	3
041	03/3/2008	8-10	1355	9,5	7,35	Ca-Na-Cl-SO ₄ -HCO ₃	3
042	03/3/2008	4-6	192	-0,1	8,23	Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄	3
061	05/3/2008	15	478	4,8	7,96	Ca-Mg-SO ₄ -HCO ₃	3
062	05/3/2008	6-8	413	4,5	7,89	Ca-Mg-Na-SO ₄ -HCO ₃	3
071	11/3/2008	4-6	1176	4,8	7,55	Ca-SO ₄	4
072	12/3/2008	12-15	246	5,7	8,15	Ca-Na-HCO ₃ -Cl	4
073	12/3/2008	4-6	275	5,3	8,28	Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄	4
075	12/3/2008	<1	198	7,5	8,25	Ca-Mg-HCO ₃	4
076	12/3/2008	2-4	160	6,6	8,17	Ca-HCO ₃	4
079	13/3/2008	4-6	124	11,4	8,08	Ca-Mg-HCO ₃	4
081	13/3/2008	2-4	855	6,9	5,38	Ca-SO ₄	4
082	13/3/2008	15-20	625	4,1	6,66	Ca-SO ₄ -HCO ₃	4
083	13/3/2008	12-15	342	3,5	8,03	Ca-SO ₄ -HCO ₃	4
065	11/3/2008	20	896	3,1	7,85	Ca-SO ₄	5
066	11/3/2008	100	1024	4,9	8,09	Ca-SO ₄	5
067	11/3/2008	6-8	1509	4,7	7,94	Ca-SO ₄	5
068	11/3/2008	6-8	1637	4,4	7,69	Ca-SO ₄	5
069	11/3/2008	15	1710	4,0	7,46	Ca-SO ₄	5
070	11/3/2008	4-6	1903	10,5	7,65	Ca-SO ₄	5
017	24/2/2008	4-6	2520	5,3	7,18	Ca-SO ₄	6
018	24/2/2008	2-4	2420	5,1	7,21	Ca-SO ₄	6
019	24/2/2008	<1	2430	5,1	7,18	Ca-SO ₄	6
021	24/2/2008	<1	324	8,6	8,00	Ca-Mg-HCO ₃	6
031	29/2/2008	<1	278	6,1	8,03	Mg-Ca-HCO ₃	6
032	29/2/2008	6-8	2280	9,9	8,19	Ca-Mg-SO ₄	6
033	29/2/2008	1-2	2610	13,4	8,14	Ca-Mg-SO ₄	6
034	29/2/2008	6-8	2260	6,0	7,50	Ca-SO ₄	6
043	03/3/2008	2-4	2200	5,1	7,53	Ca-SO ₄	6
044	03/3/2008	10-12	2290	5,7	8,19	Ca-SO ₄	6
045	03/3/2008	2-4	2420	4,5	7,93	Ca-SO ₄	6

Anhang 11. Hydrochemischer Befund der Quellen und Oberflächengewässer, Corredor Bioceánico Aconcagua

Werte in [mg/l], auf Basis der Befunde von ALS Environmental, Santiago.

Nr.	Art	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ³⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
01	Quelle	549	39.6	152	0	161	1332	295	0.2
02	Quelle	554	43.5	150.3	0	175	1145	201	0.1
03	Quelle	567	44.4	153.1	0	176	1187	204	0.1
04	Quelle	525	48.1	141	4	212	1115	189	0.4
05	Quelle	552	41.9	141.3	0	197	1353	344	0.2
06	Quelle	523	29.5	80.8	0	135	1208	118	0.3
07	Quelle	502	20.9	82.1	0	57	1233	23	0.2
08	Quelle	23	4.7	4	0	53	28	0	0.13
09	Quelle	14	3.3	3.2	0	45	0	0	0.1
10	Bach	152	16.4	6.1	0	75	335	0	0.2
11	Quelle	11	3.0	2.9	0	40	0	0	0.2
12	Quelle	12	3.1	2.8	0	46	0	0	0.1
13	Quelle	12	3.1	2.9	0	48	0	0	0.4
14	Quelle	13	3.1	2.8	0	47	0	0	0.1
15	Quelle	15	3.1	2.8	0	47	0	0	0.1
16	Quelle	1096	50.7	4016	169	1328	1587	7075	0.1
17	Quelle	515	65.3	8.3	0	219	1345	0	0.03
18	Quelle	505	64.2	4.8	0	205	1203	0	0.03
19	Quelle	513	61.7	3.9	0	206	1392	0	0.1
20	See	46	33.1	38.6	3.6	51	231	23	0.3
21	Quelle	40	14.3	2.5	0	141	0	0	0.5
22	Bach	115	26.7	37.3	2.4	197	233	31	0.02
23	Quelle	152	8.7	11.9	0	165	243	0	0.1
24	Quelle	49	3.5	4.2	0	46	87	0	0.2
25	Quelle	93	8.3	5.1	0	57	200	41	0.3
26	Quelle	109	9.5	5.8	0	60	236	0	0.2
27	Quelle	112	9.6	5.8	0	58	261	0	0.2
28	Quelle	114	9.8	6	0	59	250	0	0.2
29	Quelle	90	8.3	6.4	0	57	227	0	0.2
30	Quelle	109	9.8	7.4	0	63	255	0	0.25
31	Quelle	24	16.7	4.2	0	124	0	0	0.2
32	Quelle	486	78.5	7.7	2.9	151	1273	0	0.1
33	Quelle	555	93.9	9.1	3.6	102	1663	0	0.1
34	Quelle	520	56.0	5.4	2.3	121	1340	0	0.3

35	Bach	547	55.6	5.3	2.5	125	1346	0	0.1
37	Quelle	48	7.6	9.8	0	172	0	0	0.8
38	Bach	313	29.8	102.7	0	96	832	130	0.4
39	Quelle	112	13.8	46	0	126	259	32	0.94
40	Quelle	101	13.7	45.6	0	127	214	29	1.05
41	Quelle	138	20.0	107.6	2.2	168	193	177	0.42
42	Quelle	21	6.9	7	0	64	20	0	0.04
43	Quelle	509	33.7	5.3	2.2	100	1281	0	0.14
44	Quelle	532	42.2	5.2	2.6	105	1346	0	0.1
45	Quelle	522	74.6	9.3	9.2	126	1455	0	0.22
46	Bach	29	8.9	11.3	0	81	36	0	0.22
47	Quelle	328	32.4	6.4	0	107	829	0	0.07
48	Quelle	487	42.4	63.7	0	207	1155	95	0.09
49	Quelle	369	39.5	28.7	0	168	888	43	0.12
50	Quelle	564	49.9	120.7	0	282	1286	188	0
51	Quelle	565	44.4	136.2	0	195	1376	201	0
52	Quelle	557	43.7	136.8	0	163	1380	208	0.06
53	Quelle	553	43.5	136.1	0	201	1347	203	0.06
54	Quelle	571	45.0	140.5	0	200	1339	206	0.06
55	Quelle	452	44.4	49.2	0	183	1067	70	0.1
56	Quelle	181	13.4	6.7	0	70	409	0	0.39
57	Quelle	353	18.6	7.6	0	73	762	0	0.37
58	Quelle	318	19.0	7.6	0	75	736	0	0.37
59	Quelle	314	19.5	7.7	0	78	743	0	0.4
60	Quelle	563	93.8	349.9	2.8	213	1515	591	0.04
61	Quelle	55	12.7	20.1	0	78	117	0	0.18
62	Quelle	37	15.6	19.8	0	92	76	0	0.18
63	Bach	230	30.5	12.4	2.3	74	565	0	0.17
64	Bach	13	2.2	11.8	0	42	20	0	0.28
65	Quelle	158	10.4	4.4	0	51	378	0	0.13
66	Quelle	181	10.2	5.2	2.3	50	386	0	0.26
67	Quelle	298	11.8	12.3	5.3	97	682	0	0.28
68	Quelle	333	12.5	14.4	3.8	116	755	10	0.21
69	Quelle	355	13.2	14.6	2.5	126	712	10	0.16
70	Quelle	399	11.1	5.7	4.4	83	901	0	0.12
71	Quelle	217	10.3	11	2.2	86	479	11	0.23
72	Quelle	27	3.1	9.1	0	60	0	20	0.44
73	Quelle	32	8.2	3.9	0	71	37	0	0.5

74	Bach	32	6.5	7.6	0	70	47	0	0.28
75	Quelle	20	7.4	4.6	0	79	0	0	0.56
76	Quelle	20	3.6	4.6	0	65	0	0	0.53
77	Bach	20	1.6	9.4	0	71	0	0	0.26
78	Bach	140	14.5	17.9	0	65	406	0	0.23
79	Quelle	13	3.1	3.8	0	49	0	0	0.24
80	Bach	12	3.0	3.4	0	46	0	0	0.18
81	Quelle	130	7.0	10.8	0	0	355	0	0.03
82	Quelle	82	11.9	15.5	0	89	191	18	0.23
83	Quelle	45	6.5	4.8	0	62	86	0	0.25
84	Bach	141	3.8	9.5	0	0	411	0	0.06
85	Bach	23	2.2	8.6	0	48	21	16	0.34

Anhang 12. Gewichtung der Einflussfaktoren beim geothermischen Modell des Basistunnels beim Corredor Bioceánico Aconcagua

Faktor	Corredor Bioceánico Aconcagua
Leitfähigkeit der Gesteine [W/m/K]	Rhyolite, Andesite etc.: ~ 3 Basalt: 2,3 Sedimente: ~ 2 Gips: ~ 0,5 bis 1
Geothermischer Gradient [°C/km]	unbekannt
Wärmefluss [mW/m²]	Schätzung aufgrund regionaler Literatur: 60 bis 100
Einfluss Temperatur, Druck auf Leitfähigkeit	irrelevant
Änderung der Temperatur	nicht berücksichtigt
Senke	~ 0 bis ~ 15°C
Hydrogeologie	starker Einfluss: Vorliegen einer Thermalquelle
Geomorphologie	stark relevant, Effekt der Glättung gemäß Jaboyedoff (1999)
(Maximale Überlagerung)	(bis 2.250 m)
Radioaktiver Zerfall	mäßig relevant
Permafrost	kaum relevant
Erhöhte Solarstrahlung	mäßig relevant

Mein Lebenslauf wird aus Gründen des Datenschutzes in der elektronischen Fassung meiner Arbeit nicht veröffentlicht.