Pumpspeicherkraftwerk Lagobianco : der Ingenieurgeologe im Projektierungsprozess

Autor(en): **Zwahlen, Peter**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Swiss bulletin für angewandte Geologie = Swiss bulletin pour la géologie appliquée = Swiss bulletin per la geologia applicata = Swiss bulletin for applied geology**

Band (Jahr): **20 (2015)**

Heft 1

PDF erstellt am: **29.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-632516

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Pumpspeicherkraftwerk Lagobianco – der Ingenieurgeologe im Projektierungsprozess

Peter Zwahlen[1]

Kurzfassung des Vortrages an der SFIG-Jahrestagung vom 11. April 2014

1 Auftrag, Arbeitsziel und Unterlagen

Im Herbst 2009 hat die durch die Repower AG konstituierte Gesamtprojektleitung (GPL) des Projekts Lagobianco das Büro für Technische Geologie AG (BTG) beauftragt, die Projektierung des geplanten Pumpspeicherkraftwerks in geologisch-geotechnischen – also typisch ingenieurgeologischen – Fragen als projektierende Geologen zu begleiten. Ziel des Mandates war die Erarbeitung von geologischen Prognoseberichten zu den Stollen- und Kavernengebirgen zwischen dem Lago Bianco und dem Lago di Poschiavo. Das als Hauptelement des Projekts Lagobianco vorgesehene Pumpspeicherwerk ist in seiner Anlage im Val Poschiavo in der Fig. 1 schematisch dargestellt. Die installierte Leistung ist auf 1'050 MW ausgelegt; der Druckstollen (ohne Zugangs- und Fensterstollen) weist eine Länge von 18.1 km, der Druckschacht eine von 2.4 km auf. Als Bauzeit sind 6 bis 7 Jahre vorgesehen.
Die geotechnische Charakterisierung der überwiegend kristallinen Felsformationen innerhalb des penninisch-ostalpinen Deckenstapels zwischen dem Malenco-Serpentinit (unten) und der Bernina-Decke (oben) sollte die Grundlage zu den Konzessions-, Bau- und Auflageprojekten bilden. Dies bedingte die Definition und Ausarbeitung von Sondierkampagnen entlang der Projektachsen, die Auswertungen und Beschreibungen der Bohrkerne, der ausgeführten Bohrloch- und Labortests sowie begleitend dazu die geologische Feldkartierung.
Wir konnten unsere Untersuchungen auf der bestehenden Projektstudie zum Ausbauprojekt 2006 von W. Klemenz (2008) aufbauen. Zur Einarbeitung in die Geologie im Val Poschiavo diente uns die im Projektgebirge einzigartige «Geologische Karte der Bernina-Gruppe» von Staub (1946). Ergänzend dazu orientierten wir uns bezüglich der aktuelleren petrographischen, tektonischen und stratigraphischen Nomenklatur am geologischen Atlasblatt Bernina (unmittelbares Nachbargebiet) und dessen Erläuterungen (Spillmann 2005/2007) sowie an der geologischen Malencokarte (Montrasio et al. 2004). Die Planunterlagen zu den Berichtsbeilagen, von denen einige exemplarisch in die vorliegenden Figuren eingeflossen sind, hat die Vermessungsabteilung der Repower AG ausgearbeitet und die geologischen Projektberichte sind durch das Büro für Technische Geologie AG erstellt worden.

2 Sondierkampagne 2010 auf das Konzessionsprojekt: Baurisiken erkennen

Mit der Sondierkampagne 2010 sollten entlang der Projektachse die Gebirgsentwürfe der Projektstudie Klemenz (2008) sowie die eigenen Vorstudien zum Gebirgsbau geprüft

[1] BTG Büro für Technische Geologie AG, 7320 Sargans

werden. Dazu waren zehn Sondierbohrungen zwischen 100 und 250 m sowie Bohrlochtests und felsmechanische Labortests an typischen Kernproben vorgesehen. Parallel zur Bohrbegleitung (Bauleitung und geologische Bohraufnahmen) haben wir den Gebirgsstreifen über den Stollenachsen durchgehend geologisch kartiert und damit die wesentlichen Deckenstrukturen, Lithotypen und Oberflächenmorphologien charakterisiert und beschrieben (Fig. 2, 4, 8 und Tab. 1). Die Gesamtresultate der Sondierungen 2010 haben wir im Bericht BTG 2011 (5346-2) zusammengefasst, der neben vielen Gebirgs- und Bohrprofilen bereits Ansätze zum geotechnischen Kennwertebericht enthielt. Damit war eine geologische Grundlage mit einer zuverlässigen Charakterisierung der Felsformationen zur weiteren Projektierung erstellt.

Aufgrund dieser Erkenntnisse war es möglich, wesentliche geologische Projektrisiken wie grosse, tektonische Mylonit- und Kakiritzonen und tiefgreifende Felssackungen zu erkennen und genauer zu orten sowie entsprechende Massnahmen in die Projektierung einfliessen zu lassen.

3 Sondierkampagne 2011 auf Variantenvorschläge, Auflageprojekt: Risiken vermeiden bzw. abmindern

Im Sommerhalbjahr 2011 haben wir acht unterschiedlich tiefe Sondierbohrungen spezifisch auf die 2010 erkannten, gestörten Gebirgsbereiche (Scherzonen mit wesentlichem Sprödbruchanteil, tiefreichende Sackungsmassen) angesetzt. Die Schrägbohrung KB11 schloss die rauwackehaltige (Trias) Aufschiebung des Alv-Zuges auf. Auf der geologischen Kartierung und den Bohraufnahmen von KB11 basierend konstruierten wir die Strukturisohypsen des Alv-Zuges, welche uns zur Konstruktion des geologischen Idealprofils Fig. 3 orthogonal zum Streichen der Alv-Störungen leitete. Die gewonnenen strukturgeologischen Erkenntnisse zusammen mit den relativ günstigen Resultaten der Bohrlochtests (geringe Gebirgsdurchlässigkeiten selbst in den Rauwackezügen, nur geringmächtige «gebräche» Störzonen mit tiefen E-Moduli; Fig. 3 und 4, BTG 2011 Bericht 5346-16) gestatteten uns die Stollenvariante gemäss Fig. 3 vorzuschlagen. Im Vergleich zum Basisprojekt versprach die Variante die kürzest mögliche Durchörterung des Alv-Zuges und dies in unmittelbarer Nähe zur Montagekaverne, d. h. unter kontrollierbaren Bedingungen, die auch einen allfälligen, örtlich konventionellen Vortrieb ermöglichten. Angesichts dieser bautechnischen Vorteile entschied sich die GPL Lagobianco trotz ca. 200 m längerer Stollenachse für die empfohlene Stollenvariante.

Ein weiteres bautechnisches Risiko lauerte in den oberflächlich kartierten Grosssackungen von Cancian. Die etwa 2 km breite Kar- und Sackungsmulde wurde seismisch kartiert. Die Seismogramme liessen die Oberfläche des stabilen Felsens bei pessimistisch tief angenommenen Reflektoren erkennen. Aufgrund dieses Befundes verlegte die GPL die Stollenachse weit in den Süden und damit an die Landesgrenze, so dass die Sackungsbasis mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht angefahren wird (Fig. 5 und 6, BTG 2012 Bericht 5346-22). Damit entschied sich die GPL auch hier für eine Verlängerung der Stollenachse.

Weitere Sondierungen und Felstests der Kampagne 2011 wurden auf den Projektbereich Wasserschloss – Apparatekammer – Druckschacht – Installationsplatz Motta da Torn und den Zugangsstollen Torn angesetzt. Wichtigste Erkenntnis für diesen Projektabschnitt war, dass die Überschiebung der Bernina-Decke auf die Marinelli-Paragneise der Sella-Decke derart mächtig und mylonitisch-kakiritisch ausgebildet ist, dass diese Störzone zu meiden war. Dadurch mussten Varianten studiert werden, mit denen der ganze Abschnitt Apparatekammer – Druckschacht – Maschinenkaverne – Ein-

Tektonische und geologische Einheiten im Untersuchungsgebiet				
Tektonische Einheit	Lithologische Einheit, Geologische Formation	**Gesteinstyp**, Klassifikationseinheit		Beschreibung
Bernina-Decke	**Stretta-Kristallin**	**Orthogneis** (Altkristallin)		quarzitische Hellglimmergneise, Augengneise, Mylonitgneise
		Paragneis und -schiefer (Altkristallin)		feinkörnige Bändergneise, Glimmergneise, gebänderte Chlorit-Serizitschiefer, dunkle Graphit-Chlorit-Serizitschiefer
	Alv-Zug: Dolomitformationen der jüngeren Trias Raibl-Formation und ältere Trias Fuorn-Formation der frühen Trias	**Metasediment**	**Dolomitmarmor**	Grauer, massiger Dolomitmarmor
			Rauwacke	Rauwacke, Zellendolomit, evtl. mit Anhydritresten, kavernös
			Schiefer der detritischen Basis	kalzitisch sandige Chlorit-Epidot-Hellglimmerschiefer, mit Rauwacke- und plattigen Quarzitlagen
	Bernina-Kristallin	**Orthogneis** (Altkristallin)		helle, z.T. quarzitische Augen- und Glimmergneise
		Paragneis und -schiefer (Carale-Serie, Altkristallin)		Chlorit-Hellglimmerschiefer, gebänderte Glimmergneise
	Serpentinit	**Serpentinit** (Altkristallin)		massiger Serpentinit mit Nephrit, Chlorit, Magnetit
	Brusio-Granit	**Granit, Granitgneis** (spätvariskische Intrusion)		mittelkörniger Biotit-Granit, randlich vergneist, z.T. mylonitisch
	Basismylonit	**Mélange** Mylonite bis Kakirite		zerscherte, z.T. kakiritisierte Schiefer und Gneise
Sella-Decke	**Marinelli-Formation**	**Paragneis und -schiefer** (Marinelli-Fm, Altkristallin)		Muskovit-Chlorit-Gneis bis -Schiefer, Augengneise, z.T. quarz- und feldspatreich
	Sella-Kristallin Orthogneise i. A.	**Orthogneis** (Altkristallin)		Augen- und Glimmergneise, Quarzite
	Sella-Granodiorit	**Granit, Granitgneis** (spätvariskische Intrusion)		Hornblende-Granodiorit, vergneist bis mylonitisiert
	Musella-Granit	**Granit, Granitgneis** (spätvariskische Intrusion)		porphyrischer Hornblende-Biotit-Granit, z.T. vergneist
Margna-Decke	**Maloja-Formation:** Margna-Kristallin	**Paragneis und -schiefer** (Maloja-Fm, Altkristallin)		gebänderte Chlorit-Glimmerschiefer, z.T. granatführend
	Margna-Sedimente: Allgäu-Formation Dolomitformationen der jüngeren Trias Fuorn-Formation	**Metasediment**	**Allgäu-Formation** inkl. Aptychenkalk, Radiolarit	dunkelgraue gebänderte Sandkalke, kieselige Kalkmarmore, Kiesel- und Kalkschiefer
			Dolomitmarmor	hellgelber, massiger Dolomit, grauweisser, plattiger Dolomit, an der Basis mit Rauwackelagen
			Schiefer der detritischen Basis	graue bis grünliche, kalzitführende Chlorit-Hellglimmerschiefer mit Rauwacke- und Quarzitlagen
Malenco-Forno-Lizun-Decke	**Malenco-Serpentinit**	**Serpentinit** (Basalteffusiva des zentralen Tethysrückens)		Schiefrige bis massige Serpentinite mit grobkörnigem Diopsid, Olivin und Magnetit wechselnd mit Chlorit-Antigorit-Talk-Schiefern

Tab. 1: Lithotypen als Klassifikationseinheiten, wie sie in den geologischen Profilen und im Kennwertebericht verwendet wurden.

Auslaufbauwerk-Lago di Poschiavo einheitlich in die Marinelli-Formation zu liegen kam.
Mit der Sondierkampagne 2011 wurden sehr viele Testdaten (Bohrloch- und Felslabortests) generiert. Dies veranlasste die Planungsingenieure die Projektgeologen zu beauftragen, die geotechnischen Daten und gebirgsspezifischen Charakteristiken ab 2012 in einem gesonderten «Kennwertebericht» zusammenfassen (BTG 2014, Kennwertebericht 5346-23).

4 Sondierkampagne 2012 auf den Projektabschnitt Wasserschloss – Druckschacht – Kavernenbauten – Ein-Auslaufbauwerk-Lago di Poschiavo (EAB-LdP)

Mit der Sondierkampagne 2012 wurden die Variantenentwürfe «Marinelli-Formation Nord» des Projektabschnittes Druckschacht – Maschinenzentrale – EAB-LdP getestet. Da diese Variante die definitive Positionierung der Kraftwerkzentrale als Kavernenbauten in die Gneise der Marinelli-Formation bedingte, wurde gleichzeitig in Camp Martin der Sondierstollen I in Richtung des Kavernengebirges vorgetrieben.
2012 wurden sechs Sondierbohrungen à 100 bis max. 336 m abgeteuft. Die räumliche Auswertung dieser Sondierbohrungen zusammen mit den begleitenden Oberflächenkartierungen gestatteten den Entwurf einer Strukturkarte mit zuverlässiger Isohypsenkonstruktion der gestörten Überschiebung Bernina-/Sella-Decke (Fig. 8 und 10). Mit Hilfe dieser Karte konnte eine Anlagevariante definiert werden, deren Stollen- und Kavernenachsen vom Wasserschloss bis zum EAB-LdP sicher innerhalb der Marinelli-Formation zu liegen kommen, womit das Projektrisiko Basismélange der Bernina-Decke definitiv gemieden wurde (Fig. 7, BTG 2013 Bericht 5346-31).
Mit der Tiefbohrung KB 45 (336 m) wurde die Grosssackung Motta da Torn in einer Mächtigkeit von 134 m (vorwiegend Brekzien aus Brusio-Granit, sehr dicht gepackt in sandig-siltiger Kakiritmatrix) und die Störzone Bernina-/Sella-Decke in 300 bis 310 m Tiefe durchörtert. Zusammen mit den Sondierbohrungen durch die Sackung Torn oberhalb des Lago di Poschiavo konnte die Gesamtsackung umfassend beschrieben werden (BTG 2013 Bericht 5346-31 und BTG 2014 Bericht 5346-25, Fig. 10). Mit den letzten Folgemessungen an den versetzten Inklino-, Gleitmikro- und Extensometern wurden innerhalb der Sackung kriechende Bewegungen von 0.3 mm/Jahr (Basis am Lago di Poschiavo) bis 8 mm/Jahr am Sackungskopf (Motta da Torn) eindeutig festgestellt.
Die Unterwasserstollen zum EAB-LdP müssen zwingend die Basis der Grosssackung Torn queren. Die entsprechende Geologie mit den bautechnischen Risiken sind in BTG 2014 (Bericht 5346-25 bzw. Fig. 9) beschrieben und dargestellt. Die wesentlichen Erkenntnisse daraus waren, dass die stabile Marinelli-Formation zwar stark tektonisiert (z. T. an kakiritisierten Grossbrüchen), insgesamt jedoch sehr schlecht durchlässig ist. Die Sackungsbasis bildet eine extreme hydraulische Diskontinuität. Die seeseitige Felssackung ist derart in Grossblöcke aufgetrennt, dass das Seewasser praktisch ungehindert bis an die Sackungsbasis anströmen kann. Die Seespiegelschwankungen wurden in den hydraulischen Druckgebern der Sondierbohrungen registriert.

5 Der Kennwertebericht als Grundlage für die Projektdimensionierungen der Projektplaner

Ab der Sondierkampagne 2012 haben der Artikelverfasser (generelle geotechnische Auswertungen) und Daniel Figi (Felsmechanik und Bohrlochtests) aus dem Geologenteam des BTG die anfallenden Testdaten, Gebirgscharakteristiken und Auswertungen dazu laufend in den «Kennwertebericht»

integriert. Die projektierenden Ingenieure haben diesen zu Gebirgsmodellierungen bzw. Ausbaudimensionierungen projektbegleitend genutzt. Unter fortwährenden Rücksprachen mit den Projektverantwortlichen und entsprechenden Anpassungen entstand bis 2014 ein 82-seitiges Tabellenwerk (BTG 2014 Bericht 5346-23). Dieses enthält sämtliche Resultate von Bohrloch- und Labortests, welche den bautechnisch relevanten Gebirgscharakteristiken Felsklassifikation, Felskennwerte, Verteilung der Gebirgsbereiche, Gebirgshydraulik, Spannungsverteilung und der stereographischen Orientierung der Felstrennflächen zugeordnet sind. Die Tab. 1 sowie Fig. 11 und 12 sind beispielhaft aus dem Kennwertebericht ausgezogen und stellen die Lithotypen als Klassifikationseinheiten für die Verteilung der Felskennwerte und Gebirgsklassifikation (GSI-Indizes), eine prognostische Abschätzung der Gebirgswasserzutritte sowie die Verteilung von gemessenen Gebirgsspannungen und deren tektonische Korrelation dar.

6 Ausblick und Verdankung

Die hier vorgestellten ingenieurgeologischen Untersuchungsberichte stellen zwar wesentliche Aspekte zum Untertagebau des Pumpspeicherkraftwerkes Lagobianco dar, bilden jedoch nur einen kleinen Teil der verfassten Geologischen Berichte und Aktennotizen für das Ende 2013 abgeschlossene Bauprojekt. Neben den Berichten zu den Stollentrassen und Kavernenstandorten gab es etliche Zugangs- und Fensterstollen, nachträglich verworfene Projektvarianten (z. B. das EAB-LdP durch den Crodalöc-Schuttfächer, bzw. das Delta Camp Martin oder den Fensterstollen samt Deponieareal auf der Alp Somdoss) und eine stattliche Anzahl von Aussenbauwerken geotechnisch zu beschreiben. Zusätzlich verfassten wir teilweise unter Beizug von Fachexperten Spezialberichte zu den Themen alpintektonisches Spannungsfeld und Erdbebenaktivität, Gesundheitsbelastungen durch Asbest (Serpentinit), Radonaktivität, Arsen (Kavernenzentrale Marinelli-Fm.) sowie Materialbewirtschaftung MBW (zeitlicher Anfall der Lithotypen) und ^{14}C-Altersdatierungen (Bergstürze Miralago und Zarera, Deltabildungen Lago di Poschiavo).

An dieser Stelle bedanke ich mich bestens bei der Gesamtprojektleitung Lagobianco, insbesondere bei Roberto Ferrari und Luciano Lardi, dass sie uns das mehrjährige Mandat als Projektgeologen anvertrauten und uns damit die Gelegenheit gaben, im kompetenten Projektteam zusammen mit Bau-, Vermessungs- und Maschineningenieuren sowie externen Sondier- und Testfirmen ein Wasserkraftprojekt von internationaler Bedeutung voranzutreiben. Die Mitarbeit war hochinteressant und gab unserem Team umfassende Einblicke in Ingenieurgeologie und Projektplanung.

Ein grosser Dank geht an das Geologenteam des BTG, insbesondere an Daniel Figi, für die stets engagierte und kompetente Unterstützung der anspruchsvollen Arbeit.

Sponsor: REPOWER

Referenzen

BTG Büro für Technische Geologie AG 2011: Projekt Lagobianco, Konzessionsgesuch, Druckstollen, Wasserschloss, Druckschacht. Geologisch-Geotechnischer Bericht Nr. 5346-2 vom 11. März 2011. Repower AG Poschiavo.

BTG Büro für Technische Geologie AG 2012: Projekt Lago Bianco, Variante Cambrena, Alv-Zug. Geologisch-Geotechnischer Bericht Nr. 5346-16 vom 19. Februar 2012. Repower AG Poschiavo.

BTG Büro für Technische Geologie AG 2012: Projekt Lagobianco, Druckstollen, Geologisch-Geotechnisches Längsprofil 1:10'000 Lago-Bianco – Wasserschloss, Sto 0 – 18'750. Beilagenmappe Nr. 5346-22 vom April 2012 mit Längsprofilen und Dünnschliffbeschreibungen Stand Sondierkampagne 2011. Repower AG Poschiavo.

BTG Büro für Technische Geologie AG 2014: Projekt Lagobianco, Felskennwerte, Kennwertebericht Nr. 5346-23 vom 27. März 2012, revidiert 21. Februar 2014. Repower AG Poschiavo.

BTG Büro für Technische Geologie AG 2014: Projekt Lagobianco, Einlaufbauwerk Lago di Poschiavo, Unterwasserstollen. Geologisch-Geotechnischer Bericht Nr. 5346-25 vom 23. April 2013, rev. 17. März 2014. Repower AG Poschiavo.

BTG Büro für Technische Geologie AG 2013: Projekt Lagobianco, Wasserschloss Druckschacht, Zugangsstollen Torn und Motta da Torn. Geologisch-Geotechnischer Bericht Nr. 5346-31 vom 8. Oktober 2013.

Klemenz, W. 2008: Ausbauprojekt Lago Bianco – Lago Poschiavo. Geologischer Bericht zum Ausbauprojekt 2006. Pumpspeicherkraftwerk Lagobianco, Repower AG Poschiavo.

Montrasio, A., Trommsdorff, V., Hermann, J., Müntener, O. & Spillmann P. 2004: Carta Geologica della Valmalenco 1:25'000. CNR-Italia IDPA Milano und ETH Zürich. CNR 2004.

Spillmann, P. & Trommsdorff, V. 2005/2007: Geologischer Atlas der Schweiz 1:25'000, Blatt 1277 Piz Bernina und Erläuterungen. Swisstopo Wabern.

Staub, R. 1946: Geologische Karte der Bernina-Gruppe 1:50'000. Geologische Spezialkarte Nr. 118. Schweiz. Natf. Ges., Schweiz. Geol. Komm. Orell Füssli 1946.

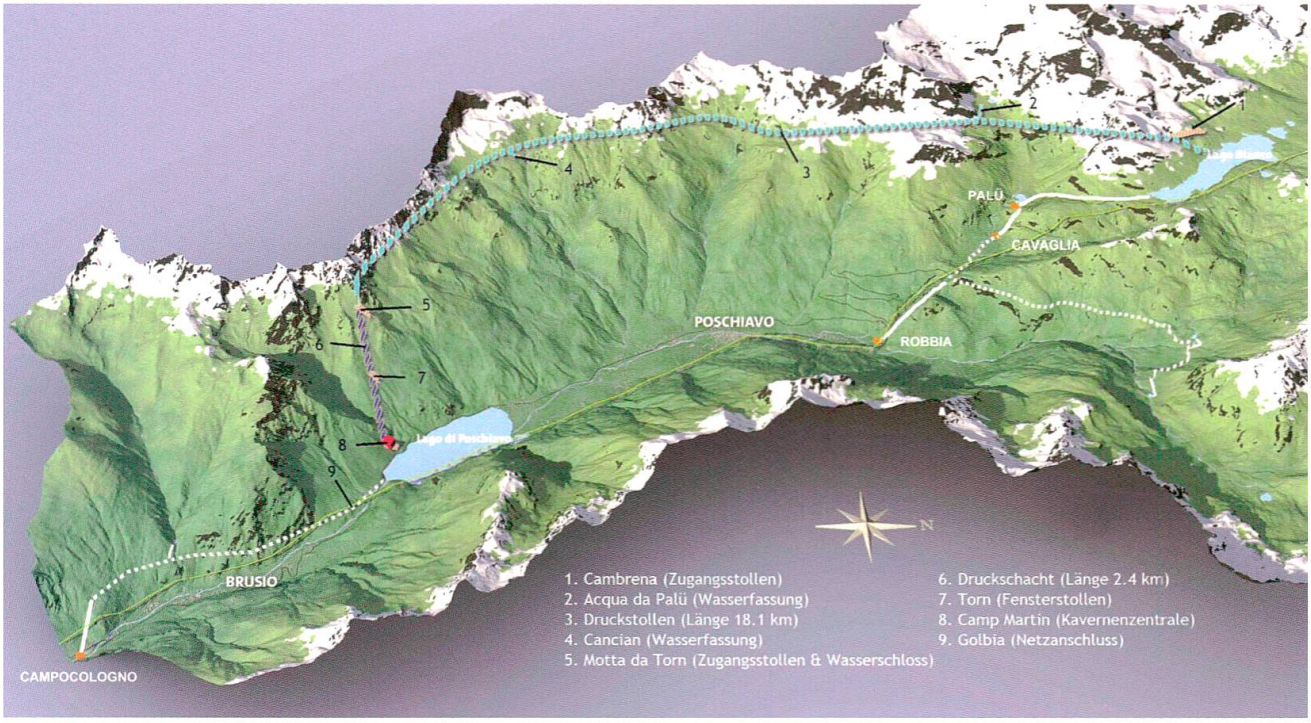


Fig. 1: Talansicht Val Poschiavo Westflanke. Repower AG Poschiavo 2015. Triebwasserschema der bestehenden Produktionsanlagen der Kraftwerke Palü, Cavaglia und Robbia sowie Campocologno I und II (weisse Linien: Druckleitungen ausgezogen, Überleitstollen punktiert). Pumpspeicherkraftwerk Lagobianco (blaue Punktlinien: Druckstollen und -schacht), Anlagenteile siehe Legende.

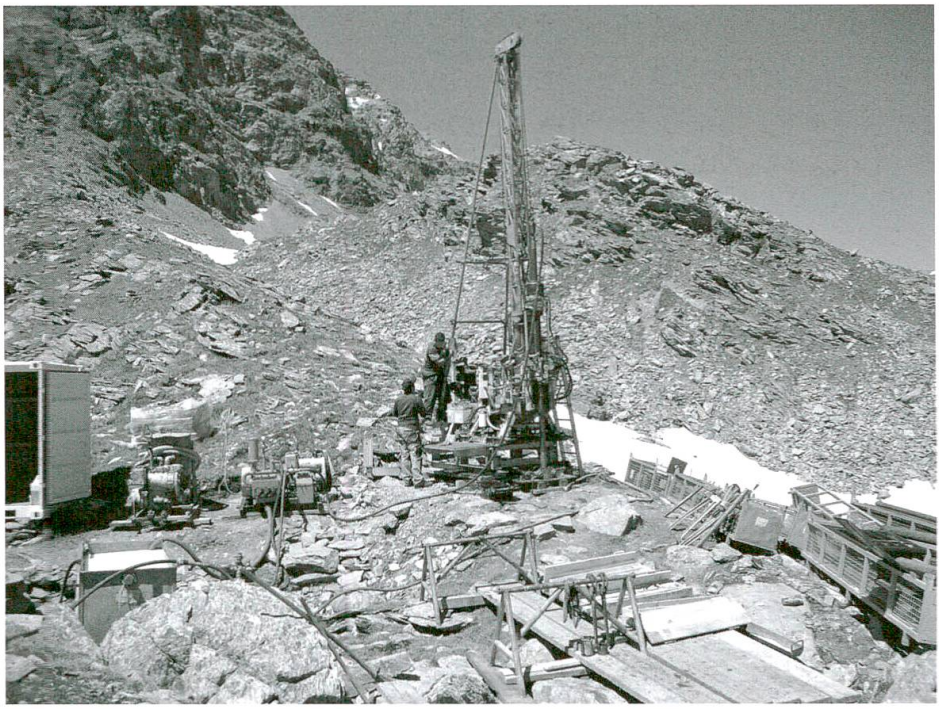


Fig. 2: Bohrstelle Motta Rossa August 2010 auf 2530 m ü. M. (BTG 2011, Bericht 5346-2).

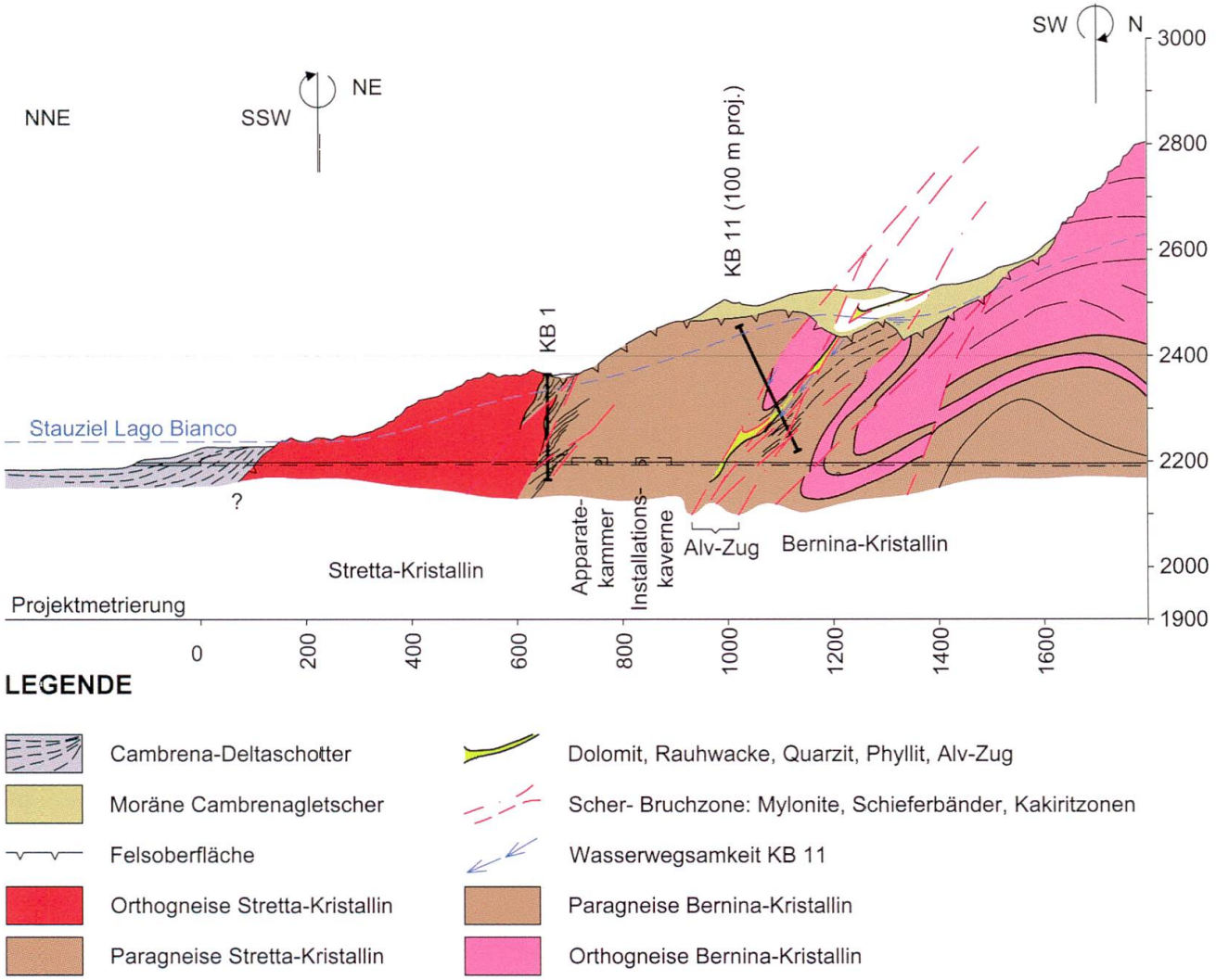


Fig. 3: Längsprofil Ein- und Auslaufbauwerk (EAB) Lago Bianco – Kavernen Cambrena – Querung Alv-Zug. Bautechnische Optimierung der Querung Alv-Zug bzw. der tektonisch gestörten Aufschiebung des Stretta-Kristallins auf die Bernina-Decke (BTG 2012, Ber. 5346-16).

Fig. 4: [Oben] Bautechnisch risikobehaftete mylonit- bis kakiritisierte basale Überschiebungszonen der Bernina-Decke. Bohrkern: lagenweise kakiritisierte Dolomite, Rauwacken und Paragneise (Altkristallin) im Alv-Zug (vgl. Fig. 3). [Unten] Ansicht der Tobelflanke Crodalöc über der Kavernenzentrale Camp Martin (Lago di Poschiavo): Überschiebung von massigem Brusio-Granit auf intensiv zerscherter Marinelli-Formation (Paragneise, vermutlich metamorphe Quarzphyllite der Ostalpen) der Sella-Decke (vgl. Fig. 8 und 9).

Fig. 5: Geologisch-geotechnisches Längsprofil Druckstollen Süd. Untere Bildreihe: Prognose von Strukturdetails an der lokalen Vortriebsbrust. In der entsprechenden Beilage zum Konzessionsprojekt ist unter dem Längsprofil die geotechnische Tabelle (Einstufung der Festgesteine und der Gefährdungen) gemäss der Normen SN 531 199 bzw. SIA 199 angefügt (BTG 2012, Ber. 5346-22).

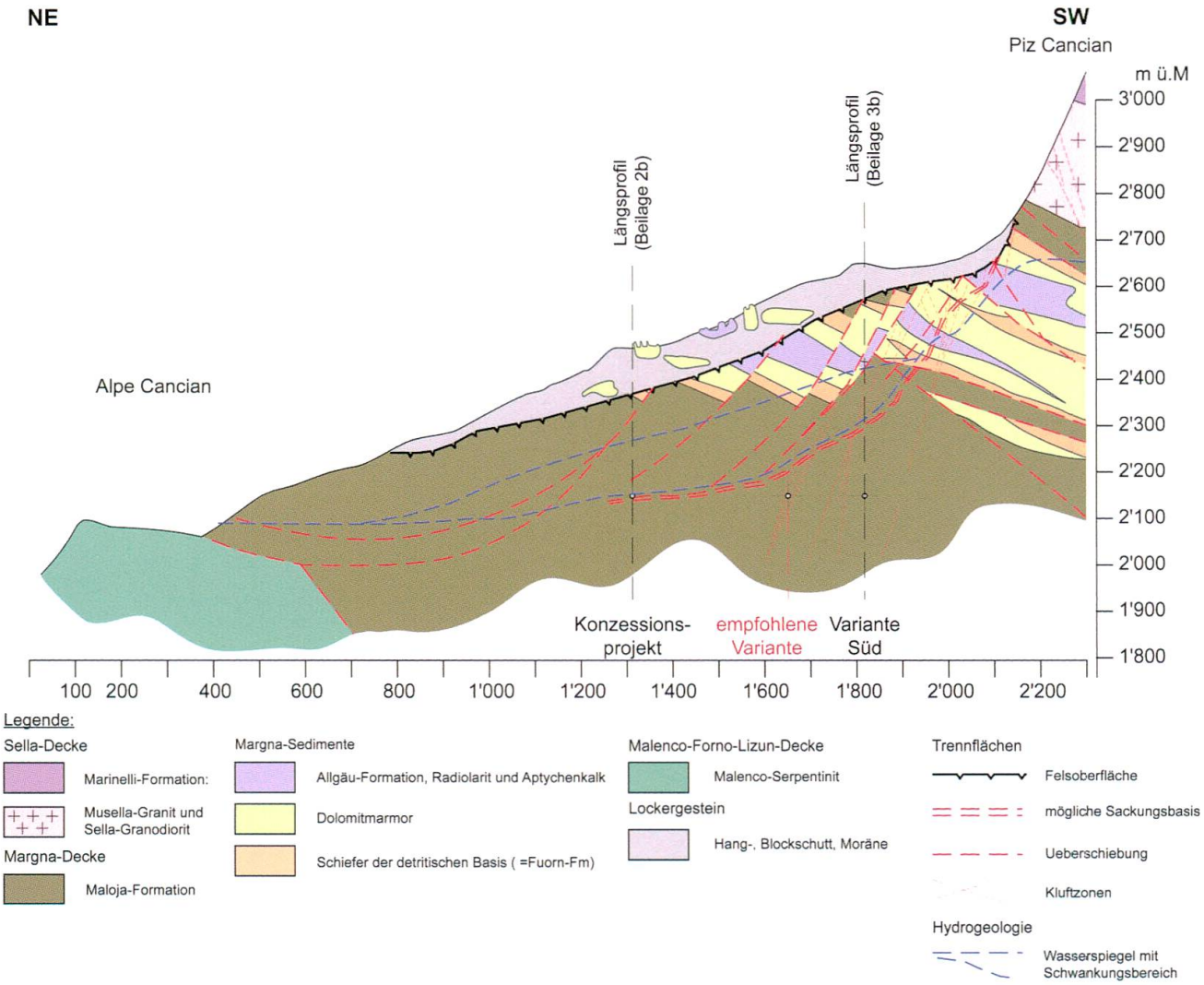


Fig. 6: Querprofil Cancian durch das Sackungsgebiet Cancian-Caral. Die Gebirgsstrukturen wurden aufgrund von geologischen Detailkarten und drei hybridseismischen Hangprofilen konstruiert. Aufgrund der Untersuchungsresultate wurde die Projektachse des Stollens aus dem Sackungsbereich nach Süden verschoben (vgl. Fig. 5).

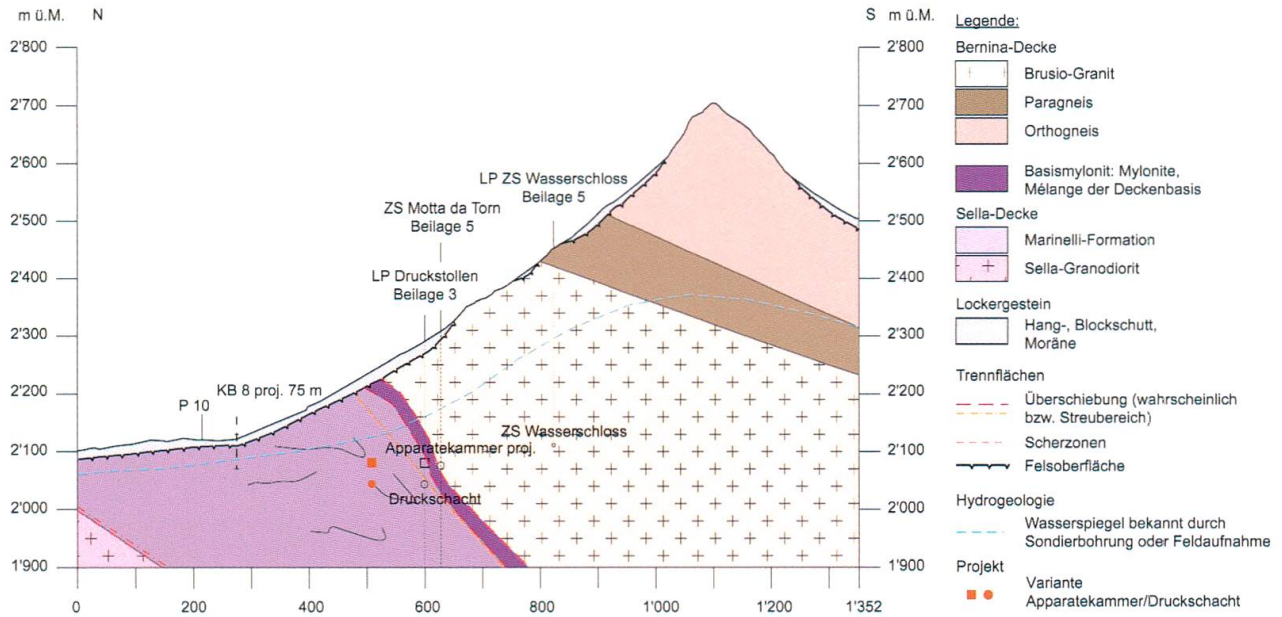


Fig. 7: Querprofil Wasserschloss – Apparatekammer I Marsc. In diesem Gebirgsabschnitt wurde eine Serie von 10 Hilfsprofilen aufgrund der geologischen Detailkarte mit Isohypsenkonstruktion des Basismylonites (vgl. Fig. 8) und vier Kernbohrungen à 100 m bis 336 m konstruiert. Aufgrund der detaillierten Erkenntnisse zum lokalen Gebirgsbau konnte die Position der Apparatekammer am Druckschachtkopf optimiert werden (abrücken aus dem tektonisierten Basismylonit; BTG 2013, Bericht 5346-31).

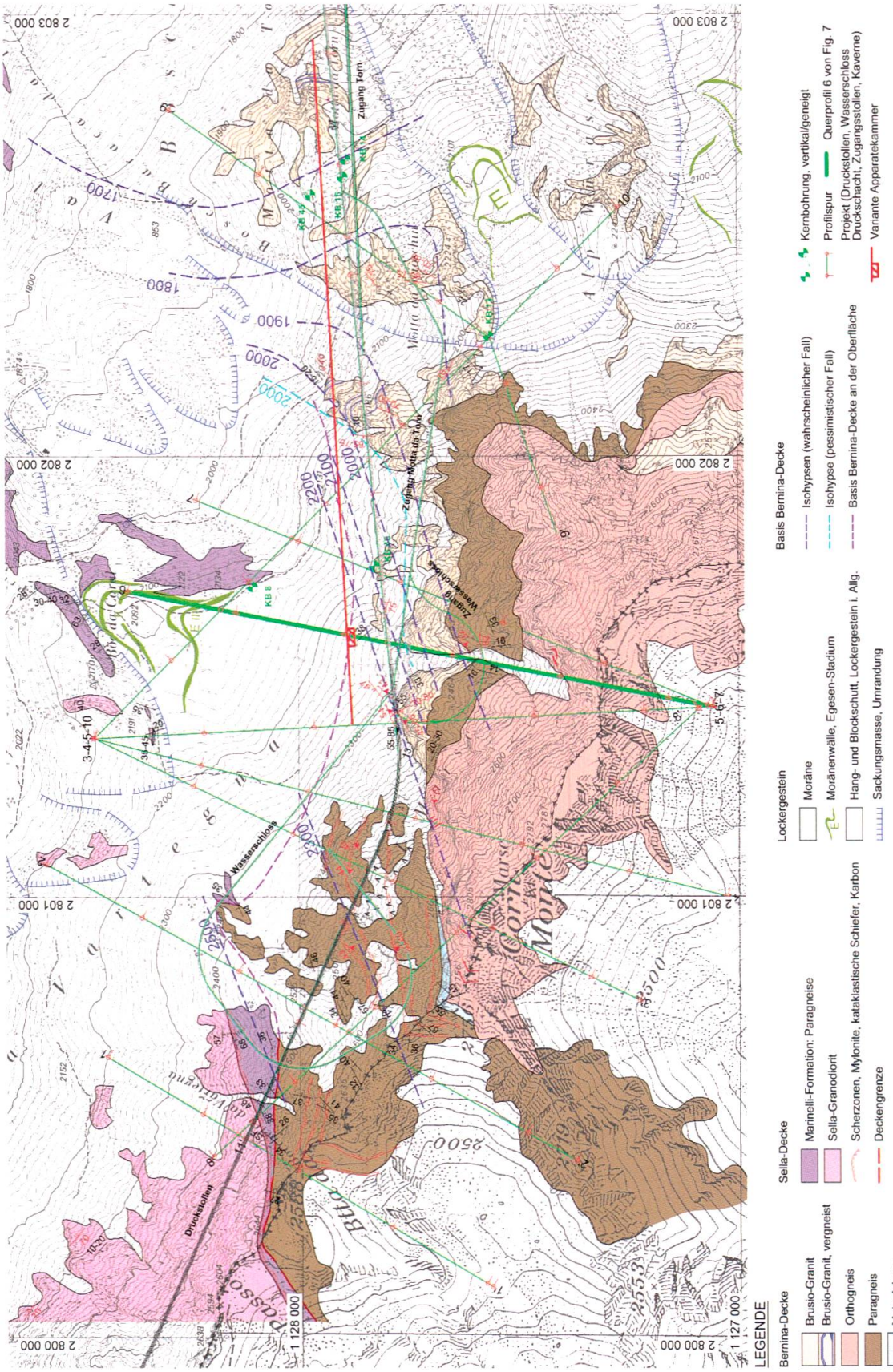


Fig. 8: Geologisch-tektonische Detailkartierung im Gebirgsabschnitt I Marsc, wo die bautechnisch anspruchsvollen Anlagenteile Apparate- und Montagekammern, Stollen und Schächte zum Wasserschloss, Druckschachtkopf sowie diverse Zugangsstollen vorgesehen sind (BTG 2013, Ber. 5346-31). Die Detailkartierungen und Tiefbohrungen KB 8, 13, 45 und 46 machten die Isohypsenkonstruktion der Überschiebung der Bernina-Decke über die tektonisierte Marinelli-Fm. (Sella-Decke) bzw. den Basismylonit möglich. Dies erlaubte, eine geotechnisch günstige Positionsvariante der Apparatekammer zuverlässig anzugeben (vgl. Fig. 7).

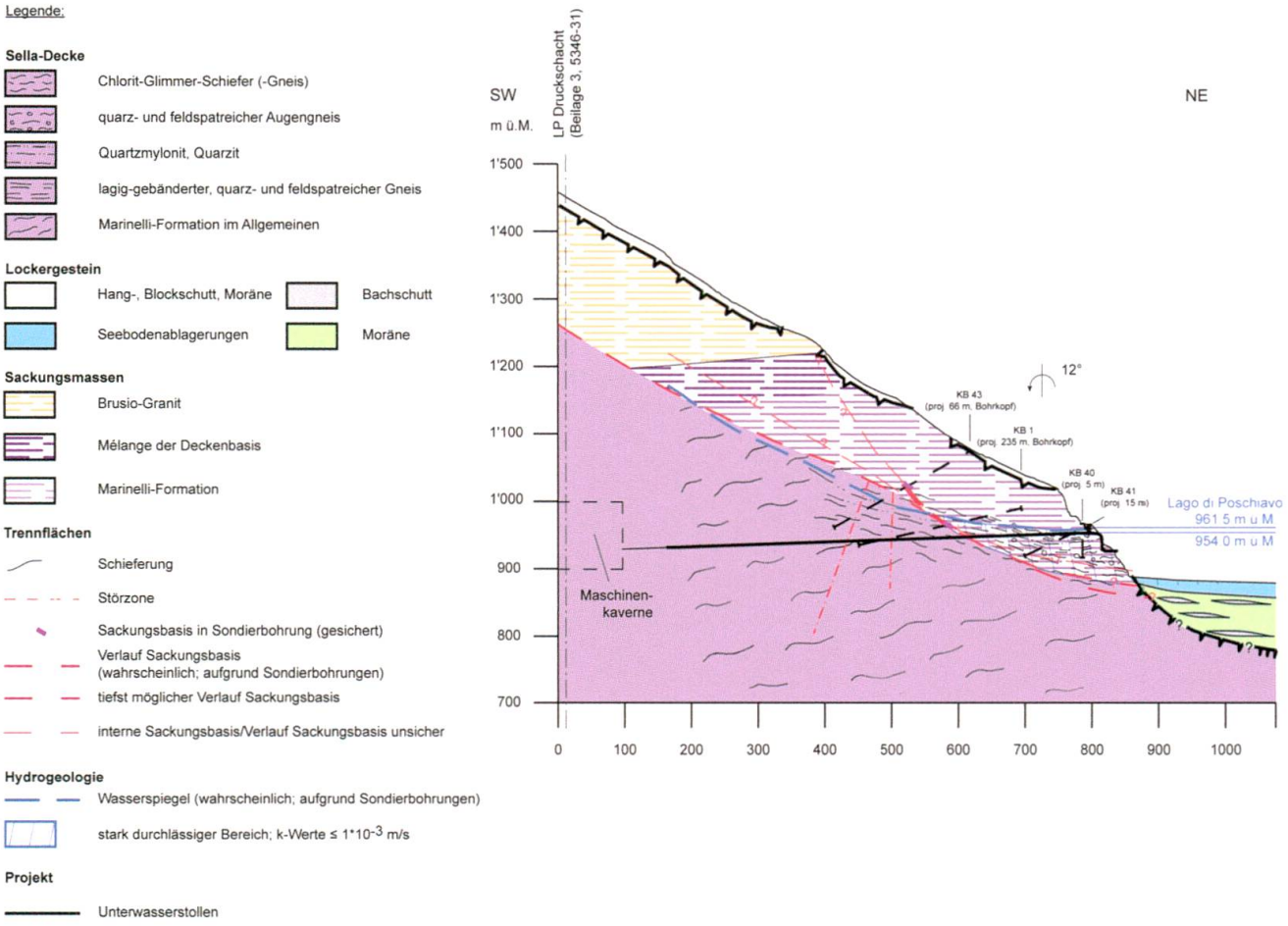


Fig. 9: Längsprofil Maschinenkaverne – Ein- und Auslaufbauwerk Lago di Poschiavo (EAB-LdP) durch die Grosssackung Torn (BTG 2014, Ber. 5346-25). Die Resultate der Sondierbohrungen ergaben die genaue räumliche Lage der Sackungsbasis sowie die Erkenntnis, dass an dieser Fläche die hydraulischen Gebirgseigenschaften sprunghaft von sehr schlecht (Marinelli-Fm.) auf hochgradig (Sackungsmasse) durchlässig wechseln.

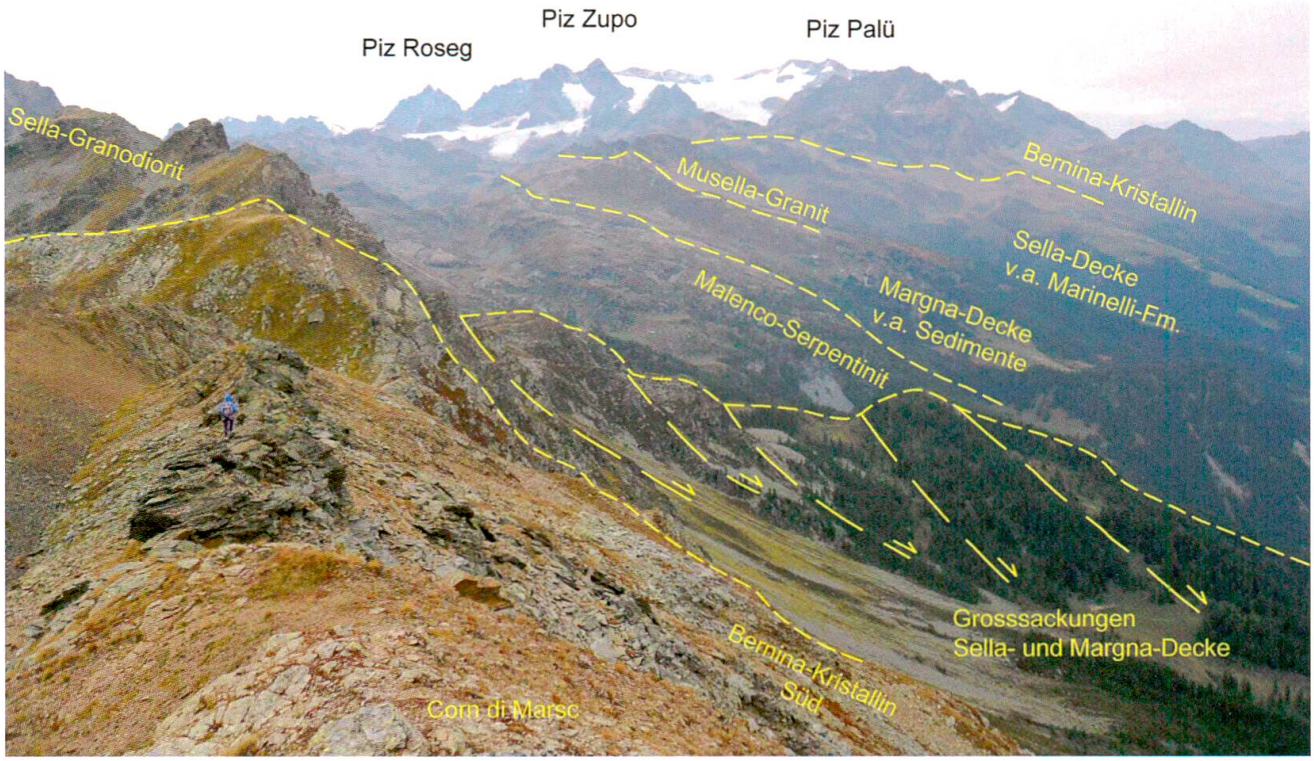


Fig. 10: Übersicht über das Projektgebirge vom Corn di Marsc (über dem Wasserschloss) mit Blick Richtung NW auf die Berninagruppe (BTG 2013).

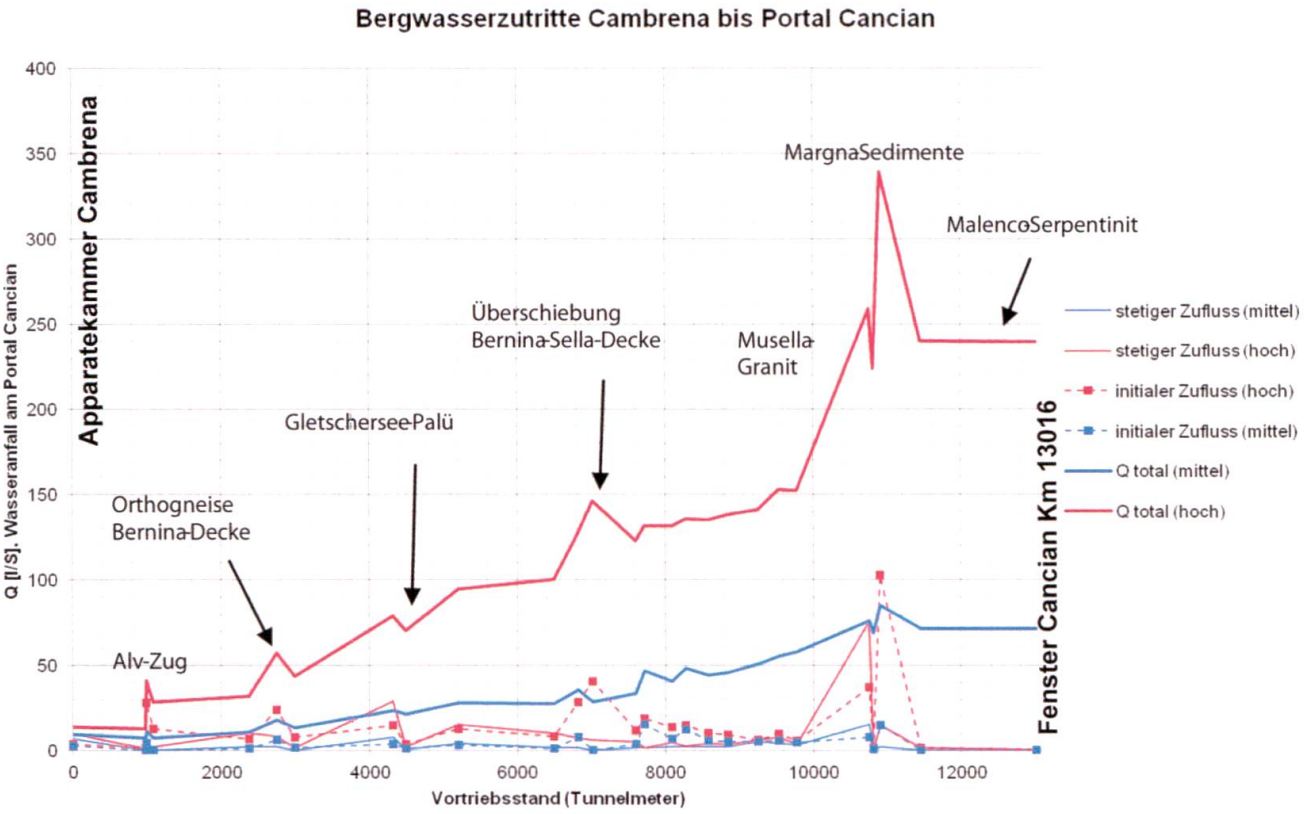
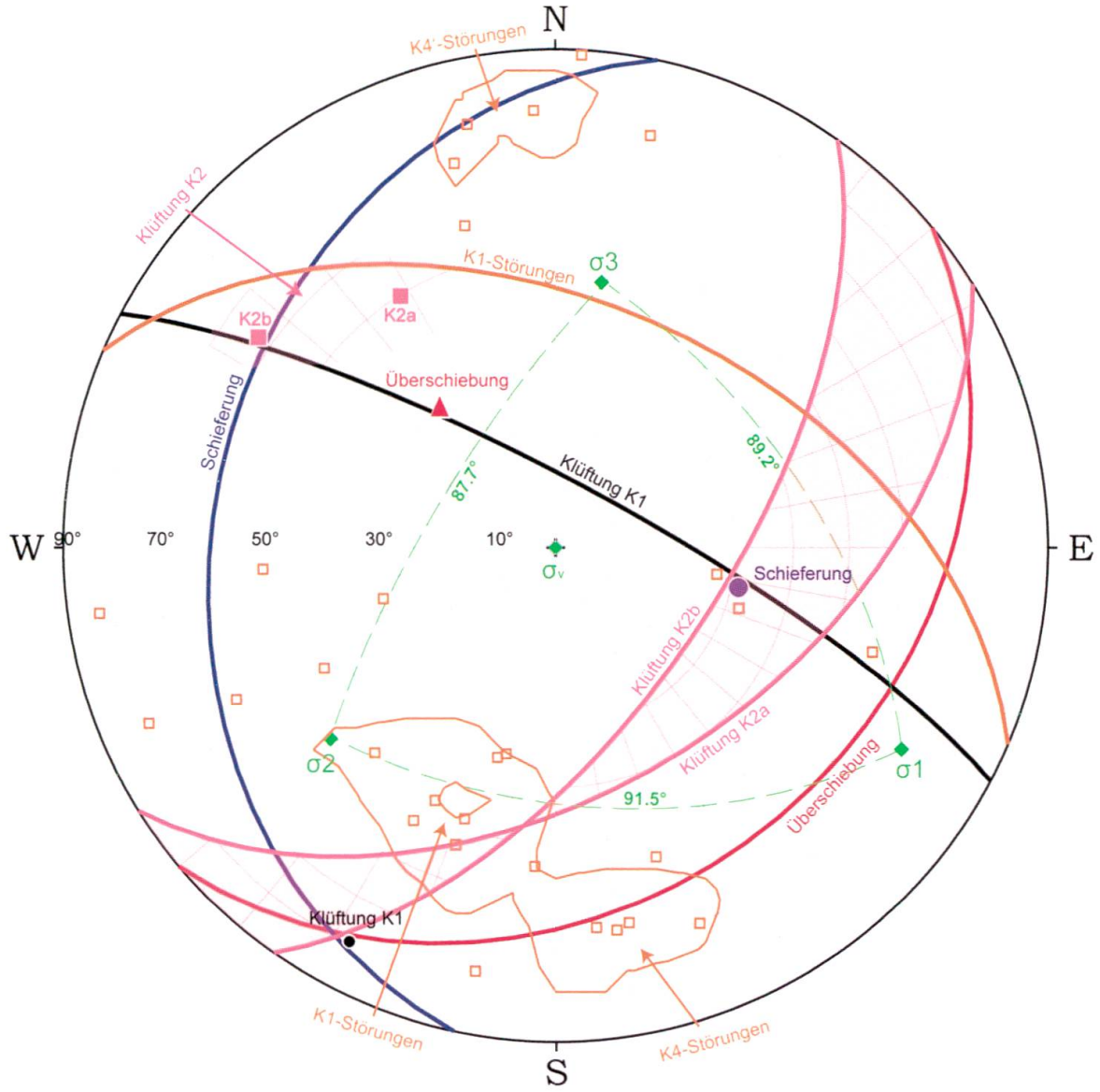


Fig. 11: Abschätzung der Bergwasserzutritte (Nordteil) zur Prognose der Wasserhaltung während der Vortriebe. Die Hydrauliktests in den Sondierbohrungen (Durchlässigkeiten, Gebirgswasserspiegel, Druckschwankungen) sowie die Feldbeurteilung der Lithotypen von Tab. 1 bildeten die Grundlage zu den berechneten Abschätzungen.



Legende

Grosskreis (Flächenschnitt)	Pol	
		Schieferung
		Überschiebung Bernina-Decke (im Kavernengebirge schwach ausgeprägt)
		Störungen, (Scher-)Brüche zu K1 und K4
		Kluft-, Bruchscharen K2 (K2a und K2b) (steilere Scherbrüche zur Überschiebung ▲)
		Dehnungsklüfte K1
		Spannungsellipsoid σ1, σ2, σ3, σv (Vektorschnittpunkte)

Fig. 12: Im Sondierstollen Camp Martin wurden auf Initiative der Projektingenieure innerhalb des Kavernengebirges Marinelli-Formation umfangreiche Sondierbohrungen ausgeführt. Das Testprogramm umfasste neben Bohrlochscanning, Dilatometer- und Hydrauliktests auch Spannungsmessungen (Hydrofracking und Schlitzsonden; BTG 2014, Bericht 5346-25).
Die Resultate zur Verteilung der gemessenen Gebirgsspannungen wurden im Kennwertebericht in verschiedenen Grafiken zusammengefasst, Fig. 12 ist eine davon und stellt im Schmidtschen Netz die räumliche Beziehung des Hauptspannungsellipsoides zu den wesentlichen Gebirgstrennflächen dar. Dargestellt ist die Gruppe von möglichen Hauptspannungstripeln, die plausibel mit den Gebirgsstrukturen und der örtlichen Gebirgsüberlagerung (Vertikalspannung σ_v = 6 MPa) korrelieren. Dabei kommen σ_1 (14 MPa) in die Überschiebungsebene der Bernina-Decke (deutliche Paläospannung) und σ_3 (4 MPa < σ_v!) in Kluft- und Bruchflächen der K1-Störungen (Dehnungsbrüche evtl. in Sackungsbasis reaktiviert) zu liegen.