

Einflüsse des Bergwassers

auf Tiefbau / Tunnelbau

© Marcel C. Wegmüller
Ingenieurbüro, Marktgasse 5, 4051 Basel
Alle Rechte vorbehalten
Herstellung: Stäubli AG, Zürich
ISBN 3 7266 0052 3

Titelbild: Tunnel Flimserstein, Strossenvor-
trieb mit Stahleinbau unter erschwerten
Bedingungen, bei einer Bergwassermenge
von ca. 100 l/sec.

ARGE Umfahrung Flims:
Lazzarini, Murer, Pitsch, Zschokke
Foto: M. Baumann, Davos Platz

Vorwort

Das Tiefbauamt des Kantons Aargau übertrug dem Verfasser 1991 die Aufgabe, die Bergwasserverhältnisse des im Bau befindlichen Bözbergtunnels zu untersuchen. Die Abklärungen brachten zutage, dass die Bergwässer des Bözbergtunnels so viele Mineral-salze enthielten, dass die geplante Tunnelkonstruktion infolge negativer Einwirkungen der Bergwässer Schaden erleiden und damit die Tragsicherheit nicht mehr gewährleistet sein wird. Umfangreiche Projektanpassungen wurden danach notwendig. Hohe Zusatzkosten und eine Bauzeitverlängerung von mehr als einem Jahr waren die Folge.

Mit der Vermutung, dass es sich dabei nicht um ein vereinzelt Phänomen handelt, versuchte der Verfasser die gewonnenen Erkenntnisse bei vergleichbaren Bauprojekten umzusetzen. Zahlreiche Projekte mit ähnlichen Problemen standen an, Projekte, bei denen Kenntnisse und Erfahrungen mit Bergwässern gefragt waren.

In dieser Zeit war es auch, dass Prof. Dr.-Ing. h.c. R. Fechtig mit der Idee auf mich zutrat, die Problematik rund um die Bergwässer gemeinsam in einer breit angelegten Forschungsarbeit aufzuarbeiten. So wurde aus dieser Idee eine umfangreiche Forschungsarbeit, die während den Jahren 1993–1997 am Institut für Bauplanung und Baubetrieb der ETHZ unter seiner Leitung durchgeführt wurde und nun auch die Grundlage des vorliegenden Buches bildet.

Aufgrund der Überlegung, die Resultate dieser Forschungsarbeit und all die weiteren

Erkenntnisse der bisherigen Tätigkeit auf diesem Gebiet nicht nur einem kleinen Kreis von «Eingeweihten», sondern allen interessierten Fachleuten und Studenten zugänglich zu machen, wurde in den vergangenen Jahren die vorliegende Publikation erarbeitet.

Das Buch wäre nicht ohne die Mithilfe zahlreicher Freunde zustande gekommen. An erster Stelle steht dabei Prof. R. Fechtig, der mich mit seiner Ausdauer, Weitsicht und seinem Verständnis stets von neuem motivieren konnte, die begonnene Arbeit zu vollenden. Dank gebührt natürlich auch all den Sponsoren, die uns finanziell oder wissenschaftlich unterstützt und uns auf diese Weise ihr Vertrauen geschenkt haben. Danken möchte ich nicht zuletzt auch meinen Mitstreitern Dipl.-Ing. Jan. Chabot, Regina Kilchenmann und TS Dominic Rüfenacht, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Das vorliegende Buch über die Einflüsse von Bergwässern erhebt nicht Anspruch auf Vollständigkeit. Das Werk soll dazu dienen, alle beteiligten Fachleute für die Bergwasserproblematik zu sensibilisieren, so dass sie in der Lage sind, die beschriebenen Aspekte bei ihren Projekten zu berücksichtigen und umzusetzen. Ich hoffe, es folgen weitere Publikationen von Berufskollegen auf diesem oder anderen Gebieten, um weiter gemeinsam voranzukommen.

Juli 2001

M.C. Wegmüller

Inhaltsverzeichnis

Bergwasser

Allgemeines	7
Physikalische Eigenschaften und Grundlagen	7
• Die physikalischen Eigenschaften des reinen Wassers	7
• Isotopische Zusammensetzung und radiometrische Altersbestimmungen	8
• Tritium	9
Chemische Eigenschaften und Grundlagen	11
• Das Wasser als Lösungsmittel	12
Die Löslichkeit von Gasen	12
Der pH-Wert	12
Elektrische Leitfähigkeit	14
• Oxidation und Reduktion	14
• Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht	15
• Härte des Grundwassers	17
Biologische Vorgänge	19
Wiedergabe der Analyseergebnisse	21

Bauwerksuntersuchungen

Bözbergtunnel der Nationalstrasse A3	27
San Bernardino-Tunnel der Nationalstrasse A13	39
Quartentunnel der Nationalstrasse A3	45
Gotthard-Strassentunnel der Nationalstrasse A2	49
Belchentunnel der Nationalstrasse A2	57
SBB – Alter Hauensteintunnel	69
SBB – Rosenbergtunnel	79
Freilaufstollen Fisetenbach – Hintersand der NOK	89
Kraftwerk Hinterrhein AG Thusis	
Freispiegelstollen – Fundogn – Bärenburg	95
Untersuchungen am Überleitstollen von Zervreila nach Wanna	99

Versinterungsbildung – Versinterungsverhinderung

Das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht	107
• Der Ausfällungsvorgang	108
• CO ₂ -Partialdruck der Umgebung	110
• Temperatur des Bergwassers	111
• Mineralisation des Bergwassers	112
• Druck auf das Bergwasser	112
• pH-Wert des Bergwassers	114
Praktische Möglichkeiten zur Beeinflussung der Versinterungsbildung	115
Durch Veränderung des CO ₂ -Partialdrucks können Ablagerungen entstehen ...	115
Veränderung der Temperatur des Bergwassers	115
Mineralisation des Bergwassers	115
pH-Wert des Bergwassers	116
Druck des Bergwassers	116

Berechnung der Versinterungsbildung im sekundären Entwässerungssystem anhand der Bergwasserzusammensetzung	116
• Berechnung des Stabilitätsindex (SI) nach Ryznar	116
Die Mischungskorrosion – eine Möglichkeit zur Reduktion von Ablagerungen	120
Wasserbehandlungsverfahren – Schutzmöglichkeit für das primäre und sekundäre Entwässerungssystem	126
• Einsatzmöglichkeiten für Depotsteine	127
• Härtestabilisationsanlagen, einige Beispiele	128

Folgerungen und Empfehlungen für Neubauten und Sanierungsprojekte

Die Grundlagen	131
Die im Rahmen der Forschungsarbeit festgestellten Schäden an der Rohbaustruktur	133
Schäden am Drainage- und Entwässerungssystem	134
Nachweis der Dauerhaftigkeit der Rohbaustruktur	134
• Nachweis der Dauerhaftigkeit für Beton/Spritzbeton/Fugenmörtel/Natursteine ..	134
• Was bieten sich für Alternativen?	137
Nachweis der Dauerhaftigkeit für Abdichtungssysteme	138
Nachweis der Dauerhaftigkeit für das Entwässerungssystem	138
• Ausbildung des primären Entwässerungssystems	140
• Anordnung und Ausbildung des Versinterungshohlraums	142
• Rechenbeispiel zu den beiden Skizzen	143
• Beispiele für Versinterungshohlräume	145
TBM-Vortrieb mit Tübbingausbau	146
Sprengvortrieb mit Betoninnenring	146
Sprengvortrieb mit Natursteinmauerwerk	147
Sprengvortrieb mit Betonverkleidung	147
• Optimierung des Versinterungshohlraums/Entwässerungssystems	147
• Kritische Betrachtung einiger bestehender Entwässerungssysteme in Schweizer Bauwerken	148
• Ausbildung des sekundären Entwässerungssystems	149
• Das Entwässerungssystem in quelfähigen Gesteinszonen	151
Hilfsmassnahmen	153
• Injektionen	153
• Bohrungen	155
• Wasserbehandlung	155
Betrieb und Unterhalt	157

Anhang

Bezeichnung von Mineralwässern	159
• Masseinheiten	159
• Klassierung	159
Die Mineral- und Thermalwasserprovinzen der Schweiz und ihre Kurorte	
• Jura	161
• Mittelland	164
• Alpen	164

Die Mineralwasserkarte der Schweiz und ihrer angrenzenden Gebiete

Heilquellen und Kurorte der Schweiz

Kanton Waadt	Nr. 1 bis 23	168
Südliches Ufer des Genfersees (F)	Nr. 24 bis 28	169
Kanton Freiburg	Nr. 29 bis 37	169
Kanton Wallis	Nr. 38 bis 54	170
Kanton Bern	Nr. 55 bis 153	171
Kanton Luzern	Nr. 154 bis 168	176
Kanton Uri	Nr. 169 bis 172	177
Kanton Schwyz	Nr. 173 bis 180	177
Kanton Unterwalden	Nr. 181 bis 193	177
Kanton Zug	Nr. 194 bis 195	178
Kanton Glarus	Nr. 196 bis 208	178
Kanton Zürich	Nr. 209 bis 221	179
Kanton St. Gallen	Nr. 222 bis 252	180
Kanton Thurgau	Nr. 253 bis 258	181
Kanton Appenzell	Nr. 259 bis 289	182
Kanton Graubünden	Nr. 290 bis 370	183
Kanton Tessin	Nr. 371 bis 398	187
Kanton Neuenburg	Nr. 399 bis 408	189
Kanton Jura und Berner Jura	Nr. 409 bis 420	190
Kanton Solothurn	Nr. 421 bis 431	190
Kanton Basel	Nr. 432 bis 452	191
Kanton Aargau	Nr. 453 bis 474	192
Kanton Schaffhausen	Nr. 475 bis 477	193

Aktuelle Mineral- und Heilquellen der Schweiz	Nr. 1–185 (rot)	196
--	------------------------	------------

Bergwasseranalysen aus bestehenden Tunnelbauwerken	Nr. 200–248 (rot)	204
---	--------------------------	------------

Begriffe	206
-----------------	------------

Tabellen	209
-----------------	------------

Vorkommen der Wassertypen	213
----------------------------------	------------

Literarnachweis	214
------------------------	------------

Sponsoren	215
------------------	------------

Inserate	216
-----------------	------------

Bergwasser

Allgemeines

Die Zusammensetzung eines Bergwassers wird durch die Eigenschaften des Aquifers sowie der Sickerstrecke im Untergrund bestimmt. Eine Vielzahl physikalischer und biologischer Prozesse bestimmen den späteren Charakter und die Verwendung des Bergwassers als Trinkwasser, als Wasser zur Bewässerung, im Gesundheitswesen (Bade- und Trinkkuren) und vieles mehr. Durch die Analyse der physikalischen und chemischen Eigenschaften von Wasserproben lassen sich verschiedene Fragen wie z.B. Herkunft, Entstehung, Alter, Bewegung und Regeneration des Bergwassers beantworten.

Physikalische Eigenschaften und Grundlagen

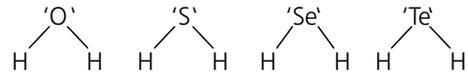
Die physikalischen Eigenschaften des reinen Wassers

Nur wenige Stoffe befinden sich unter normalen Bedingungen auf der Erdoberfläche und in den oberen Teilen der Erdkruste in flüssigem Zustand. Es sind dies: Quecksilber, Erdöl und Wasser. Wasser ist ein sehr merkwürdiger Stoff, weil er eine Fülle von Anomalien aufweist, die andere Stoffe in diesem Umfang nicht besitzen. Wasser wechselt zwar seine feste Form bei 0 °C, erreicht aber seine höchste Dichte bei 4 °C. Im Vergleich mit ähnlich aufgebauten Verbindungen sollte der Schmelz- und Siedepunkt anstelle der Fixpunkte 0 °C und 100 °C bei etwa -90 °C bzw. bei -80 °C liegen, bei unseren Umgebungsbedingungen also gasförmig sein. Diese Anomalie ist auf die Struktur des Wassers zurückzuführen.

Das Wassermolekül H-O-H ist nicht gestreckt, sondern bildet einen Winkel von 105°. Die beiden H-O-Bindungen sind

0,101 nm lang. Da die Schwerpunkte der positiven und der negativen Ladungen nicht zusammenfallen, stellt jedes H₂O-Molekül einen *elektrischen Dipol* dar. Darauf beruhen die Bindungskräfte zwischen den Molekülen, die als Wasserstoffbrücken bezeichnet werden, sowie der Zusammenschluss von H₂O-Molekülen zu Molekül-Aggregaten, die temperaturabhängig 25 (70 °C) bis 90 Einzelelemente (0 °C) umfassen.

Wasser, Schwefelwasserstoff (giftiges Gas, riecht wie faule Eier) und gleichsam Selen- und Tellurwasserstoff (ebenfalls sehr giftige, übelriechende Gase) besitzen gewinkelte Moleküle.



Im H₂S-Molekül beträgt der Bindungswinkel nur 92,2° als Folge der Abstossung der nicht bindenden Elementarpaare. Auch bei Molekülen H₂Se sowie H₂Te beträgt der Bindungswinkel ca. 90°.

Wasser besitzt eine relativ hohe *spezifische Wärmekapazität* (4,187 kJ/kg), d.h. zu seiner Erwärmung ist eine verhältnismässig grosse Wärmemenge erforderlich, die bei seiner Abkühlung wieder frei wird.

Die *Viskosität* (Zähigkeit oder innere Reibung) des Wassers beruht auf Kohäsionskräften und ist für die GW-Bewegung mitbestimmend. Die dynamische Viskosität beträgt bei 0 °C: $1,79 \cdot 10^{-3}$ Ns/m²; bei 40 °C: $0,68 \cdot 10^{-3}$ Ns/m². Tonhaltige Sandsteine oder Tone sind für elektrolytarmer Wässer kaum zu durchdringen, wohl aber für salzhaltige Wässer. Stark konzentrierte Wässer erreichen beinahe die für Luft geltenden Permeabilitätswerte.

Die *Temperatur des Grundwassers* hängt vom Wärme-Austausch mit der Luft und vom Zustrom von Wärme aus dem Erdinnern ab. Da der Temperatur-Einfluss der

Luft mit zunehmender Tiefe abnimmt und die Geothermische Tiefenstufe (auf 33 m 1 °C Temperaturzunahme) erst in grösseren Tiefen wirksam wird, findet man im humiden Klimabereich meist drei Temperatur-Zonen (Richter und Lillich 1975). Die Oberste steht unter dem Einfluss der Lufttemperatur und die unterste Zone wird vom Wärmestrom aus dem Erdinnern beherrscht. In der Zwischenzone entspricht die Temperatur des Grundwassers meist der mittleren Luft-Jahrestemperatur. Insgesamt nehmen die GW-Temperaturen je 100 m Tiefe kontinuierlich um einen bestimmten Betrag zu, der in Mitteleuropa bei ungestörten Verhältnissen zwischen 2 und 3 °C liegt. Wesentliche Abweichungen von diesem Temperatur-Gradienten gehen auf GW-Bewegungen zurück, wobei entweder wärmere Wässer aus grösseren Tiefen aufsteigen oder oberflächennahe kühlere Wässer verhältnismässig rasch in die Tiefe strömen.

Isotopische Zusammensetzung und radiometrische Altersbestimmungen

Die natürlichen Isotope der Elemente Wasserstoff und Sauerstoff spielen eine wichtige Rolle bei hydrogeologischen Untersuchungen. In natürlichen Wässern findet man unter 10^6 normalen Wasser-Molekülen ($^1\text{H}_2^{16}\text{O}$) etwa 2000 Moleküle mit dem Sauerstoff-Isotop ^{18}O (H_2^{18}O) und ca. 320 Moleküle, bei denen 1 H-Atom durch das schwere Wasserstoff-Isotop Deuterium ersetzt ist ($^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$). Beide Isotope sind stabil. Durch den geringeren Dampfdruck von H_2^{18}O und $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$ gegenüber normalem $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ kommt es bei einer Verdunstung und/oder Niederschlägen zu einer *Isotopen-Fraktionierung*.

Die stabilen Isotope des Wassermoleküls Sauerstoff-18 (^{18}O) und Deuterium (^2H) zeigen in verschiedenen Grundwasserproben typische Konzentrationsunterschiede.

Winterniederschläge weisen gegenüber Sommerniederschlägen erheblich niedrigere (abgereicherte) Gehalte an ^{18}O und ^2H auf. Grundwasser aus – relativ gesehen – höheren Einzugsgebieten oder kälteren Klimabedin-

gungen (Winter oder Kaltzeiten) zeigt deshalb eine typische Markierung durch abgereicherte Gehalte dieser Isotope (siehe Abb. 1).

Durch Vergleichsmessungen können auf diese Weise die Einzugsgebiete der beprobten Quellen näher bestimmt oder sogar Anteile von sehr «alten» Grundwässern näher identifiziert werden.

Insbesondere kann die meteorische Herkunft von Grundwässern erkannt werden, da die ^{18}O - und ^2H -Gehalte der Niederschläge und hieraus gebildeter Grundwässer auf der sogenannten mittleren Niederschlagsgeraden liegen, die durch die Relation $[\delta^2\text{H} = (8 \cdot \delta^{18}\text{O}) + 10]$ wiedergegeben ist.

Die Ergebnisse der Messung der stabilen Isotope Deuterium (^2H) und Sauerstoff-18 (^{18}O) werden auf den internationalen Standard des mean ocean water (VSMOW) bezogen und als relative Abweichung hiervon in der sogenannten δ -Notation angegeben.

Vergleicht man anhand längerer Messreihen die Gehalte von stabilen Isotopen im Grundwasser mit den Niederschlagskonzentrationen, so kann beim Auftreten von grösseren Schwankungen im Grundwasser eine schnell abfliessende Grundwasserkomponente nachgewiesen werden. In grösseren, gut durchmischten Grundwasservorkommen ohne Beteiligung von schnell abfliessenden Grundwasserkomponenten treten diese Schwankungen der Gehalte an stabilen Isotopen nicht auf.

Eine Beeinflussung des Grundwassers durch infiltrierendes Flusswasser kann ebenfalls durch Messreihen und Vergleichsmessungen nachgewiesen werden, da Fließsgewässer durch ihren direkten Bezug zu Niederschlägen ähnliche Variationen im Gehalt der stabilen Isotope aufweisen.

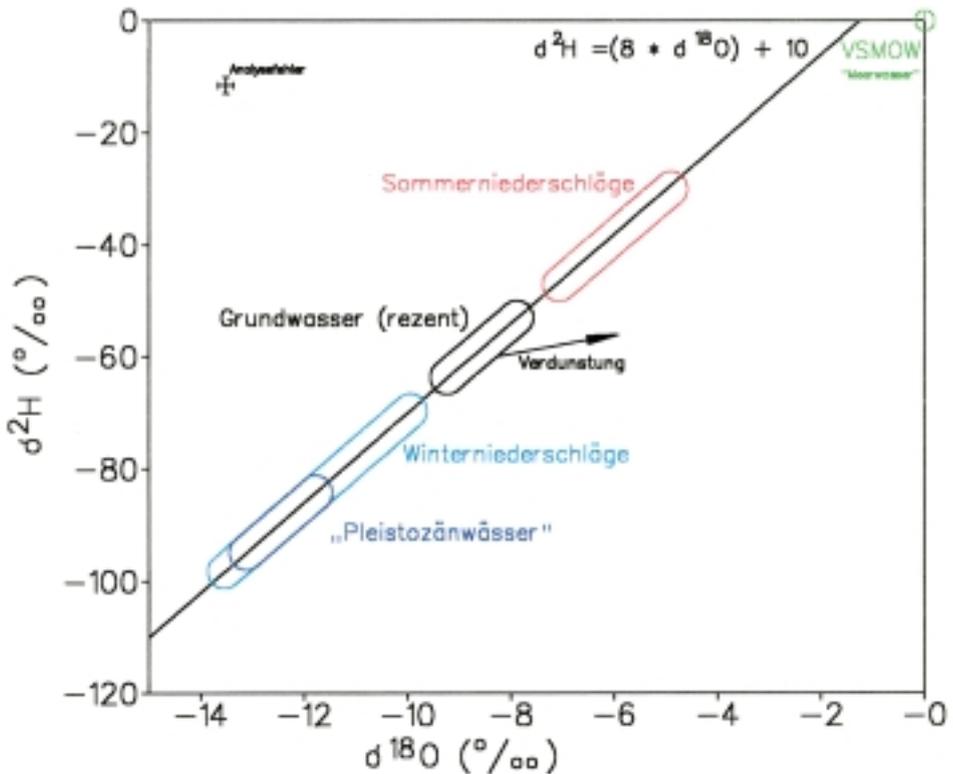


Abb. 1: Korrelationsdiagramm Sauerstoff-18- versus Deuteriumgehalt; eingezeichnet sind typische Messbereiche für verschiedene Wasserproben, Bezugsstandard und sogenannte mittlere Niederschlagsgerade [$\delta^2\text{H} = (8 \cdot \delta^{18}\text{O}) + 10$].

Tritium

Wasser enthält auch das radioaktive Isotop ^3H (Tritium). Seine Halbwertszeit beträgt 12,43 a. Tritium wird beständig in der Atmosphäre durch die Einwirkung von kosmischer Strahlung auf Stickstoffatome erzeugt. Gemessen werden Tritiumkonzentrationen in TU (tritium units). Der hierdurch entstehende ^3H -Gehalt der Niederschläge beträgt etwa 5 TU.

Heute in der Hydrosphäre vorhandenes ^3H (Tritium) ist jedoch zum grössten Teil aus Kernwaffenversuchen seit 1953 entstanden und gelangt mit den Niederschlägen zur Erdoberfläche. Von dort dringt es mit dem Sickerwasser ins Grundwasser.

Stiegen die Tritiumkonzentrationen in den Niederschlägen von 1953 bis etwa 1963 auf mehr als das Tausendfache der natür-

lichen Konzentration, so fallen die Niederschlagskonzentrationen aufgrund der Einstellung der oberirdischen Kernwaffenversuche seit dieser Zeit kontinuierlich (siehe Abb. 2). Dies ist neben den Verdünnungsvorgängen vor allem auf den radioaktiven Zerfall und die kurze Halbwertszeit zurückzuführen.

Messungen der ^3H -Gehalte von Niederschlägen werden schon seit vielen Jahren durch die Internationale Atom-Energie-Behörde (IAEA) an verschiedenen Messstellen durchgeführt.

Nachdem der ^3H -haltige Niederschlag in den Aquifer eingedrungen ist, nimmt der ^3H -Gehalt des so neugebildeten Grundwassers im einfachsten Fall nur durch radioaktiven Zerfall weiter ab.

Zur Beschreibung von komplexeren Mischungsvorgängen verschieden alter, ^3H -hal-

tiger Grundwasserkomponenten, wie sie z.B. durch die Grundwasserentnahme bei Quellen induziert werden, können hydrologische Fließmodelle angewandt werden, um die Verweilzeit des Grundwassers zu bestimmen. Diese Modellrechnungen (z.B. Exponentialmodell) haben sich bereits vielfach in der hydrogeologischen Praxis bewährt und geben Aufschluss über die Geschüttheit der Quelle bzw. des erschlossenen Grundwasserreservoirs.

Bedingt durch den Verlauf der ^3H -Gehalte der Niederschläge, mit dem Maximum im Zeitraum 1963/64, sind jedoch bei ^3H -Gehalten zwischen 20 und 40 TU methodisch bedingt Aussagen über die Verweilzeit im Untergrund oft nicht als eindeutige Ableitung möglich. Grundwasservorkommen, die ^3H -Gehalte in diesem Bereich aufweisen, können eine mittlere Verweilzeit von wenigen Jahren oder einigen Jahrzehnten besit-

zen. Eine eindeutige Klärung ist in diesen Fällen nur über mehrjährige Messreihen oder die Bestimmung des ^{85}Kr -Gehaltes der Wässer zu erreichen.

Wichtig sind zudem *radiometrische Altersbestimmungen* von Grundwasser mittels *Radio-Kohlenstoff und Tritium*. Das radioaktive Isotop ^{14}C entsteht in der höheren Atmosphäre durch die Einwirkung kosmischer Strahlung auf Stickstoff-Atome ($^{14}_7\text{N} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{14}_6\text{C} + ^1_1\text{p}$). Seine Halbwertszeit beträgt 5730 Jahre. Als $^{14}\text{CO}_2$ gelangt es in den Kohlenstoff-Zyklus der Biosphäre. Das stationäre Gleichgewicht zwischen der Bildung von ^{14}C endet nach Absterben der organischen Substanz bzw. bei Übertritt der C-Verbindungen in das Grundwasser, in dem ein Austausch mit der Atmosphäre nicht mehr gegeben ist. Im Grundwasser wird damit die ^{14}C -Konzentration und entsprechend damit das $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis mit fortschreitender

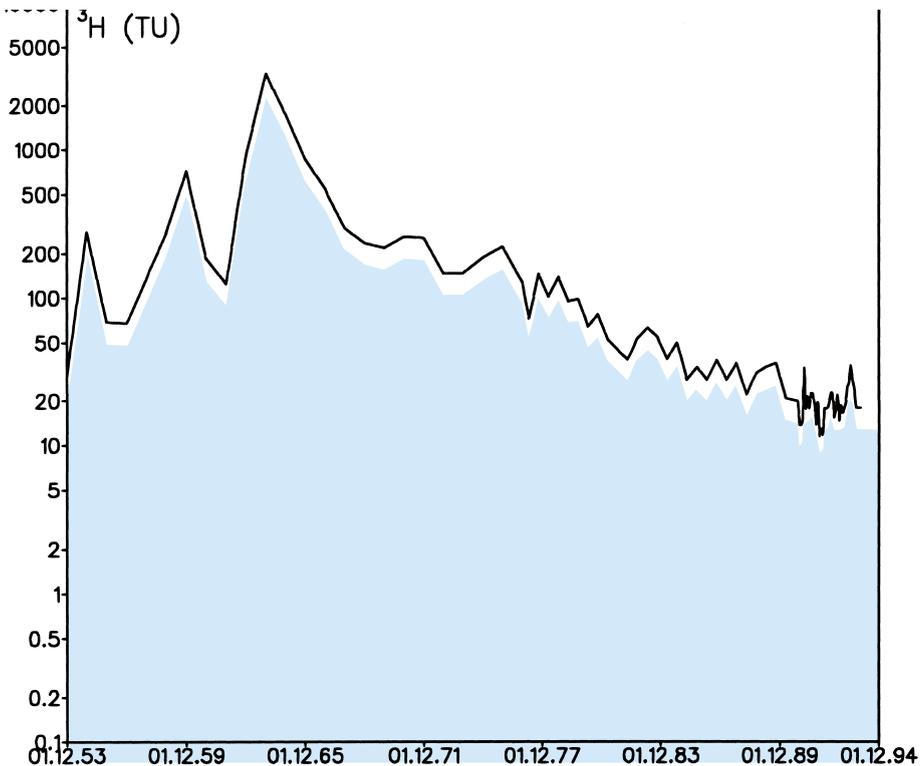


Abb. 2: Zeitlicher Verlauf der ^3H -Gehalte der Niederschläge (^3H -Input) am Beispiel der IAEA-Niederschlagsstation Karlsruhe.

Zeit immer kleiner. Aufgrund der gesetzmässigen Abnahme lassen sich Altersbestimmungen des Grundwassers durchführen, wobei die Zeitspanne zwischen 300 und 55'000 Jahren liegt.

Chemische Eigenschaften und Grundlagen

In der Natur kommt chemisch reines Wasser nicht vor. Stets sind darin andersartige Bestandteile wie beispielsweise die Ionen von Salzen oder Stoffen organischer Natur enthalten. Es liegt jedoch immer eine wässrige Lösung vor, in der die Substanz «Wasser» dominiert. Die gelösten Stoffe stammen zum kleinen Teil aus der Atmosphäre, d.h. aus Niederschlägen, und zum grossen Teil aus der vom Niederschlagswasser durchsickerten Bodenzone sowie den GW-Leitern.

Die Niederschlagswässer enthalten meist nur sehr geringe Mengen an gelösten Stoffen. Es sind Gase, Säuren und Salze unterschiedlicher Herkunft. Das Regenwasser enthält fast immer Sauerstoff (O_2) und Kohlendioxid (CO_2), das teilweise mit dem Wasser Kohlensäure (H_2CO_3) bildet. Der natürliche Anteil an gelösten Salzen stammt grösstenteils aus den Weltmeeren. Dabei handelt es sich um Chloride und Sulfate, die aus den vom Wind fortgerissenen Wasserspritzern der Meeresoberfläche herrühren. Die Cl-Menge verringert sich rasch landeinwärts. Während in unmittelbaren Küstenbereichen bis zu 20 mg/l im Regen enthalten sein können, nimmt die Cl-Konzentration im Binnenland rasch auf 5 mg/l und weniger ab.

Der Niederschlag in Industriegebieten kann erhebliche Anreicherungen von schwefeliger Säure (H_2SO_3), Schwefelsäure (H_2SO_4), Salpetersäure (HNO_3) und Schwefelwasserstoff (H_2S) enthalten («saurer Regen»). In der Umgebung von Metallhütten lassen sich oft erhöhte Gehalte an Blei, Zink und Arsen feststellen. Oberflächennahes und gut durchlüftetes Brauch- und Trinkwasser wird meist vom Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht bestimmt.

Die wesentliche Stoffanreicherung des Wassers findet in der Regel beim Durchsickern der wasserungesättigten Bodenzone statt. Es nimmt aus ihr Stoffe wie z.B. CO_2 , H_2SO_4 , Salze, Humussäuren, Zersetzungsprodukte organischer Substanzen wie Ammoniak, Nitrite und Nitrate, Salze der Kunstdünger, Pflanzenschutzmittel usw. auf. Der Gehalt an CO_2 in der Bodenluft, der durch die Wurzel-Atmung und den Abbau organischer Substanzen entsteht, kann bis zu 10 Volumenprozent erreichen. Ferner kann das Sickerwasser aus der ungesättigten Bodenzone Bakterien und Viren enthalten.

Bei Mineralwässern sind die Verhältnisse viel differenzierter. Mineralwässer stammen fast immer aus tieferen Erdschichten, in welchen sich das Wasser nur mit grosser Verspätung (Jahrzehnte) am natürlichen Kreislauf beteiligt. Dieses Wasser vermag in grossen Tiefen unter meist anaeroben Verhältnissen, grosser Wärme und hohem Druck in Verbindung mit Kohlensäure Stoffe aufzunehmen, wie dies an der Erdoberfläche nicht möglich wäre.

Die nachfolgende Tabelle verdeutlicht diesen Umstand:

Ionen in mg/l	Trinkwasser		Mineralwasser	
	Min.	Max.	Min.	Max.
Natrium Na^+	1,2	8,4	2,7	3'950
Kalium K^+	0,1	2,9	0,75	165
Magnesium Mg^{2+}	1,9	30,0	1,4	371
Kalzium Ca^{2+}	7,2	115,0	15,2	806
Chlorid Cl^-	0,4	19,8	0,7	2'407
Hydrogenkarbonat HCO_3^-	27,0	395,0	22,0	7'322
Sulfat SO_4^{2-}	10,0	48,0	9,0	1'778

Tab. 1: Gegenüberstellung der Minimal- und Maximalwerte der Hauptbestandteile der in der Schweiz vorkommenden Trink- und Mineralwässer.

Das Wasser als Lösungsmittel

Das Wasser ist das verbreitetste Lösungsmittel für feste, flüssige und gasförmige Stoffe.

Die Löslichkeit von festen Stoffen

Zunächst gruppieren sich die Wassermoleküle an die Ionen eines Kristallgitters. Bei dieser Gruppierung lagern sich die H₂O-Moleküle mit der positiven Seite ihres Dipols an die negativ geladenen Ionen des Gitters an (und umgekehrt). Sobald die anziehenden Kräfte der H₂O-Moleküle (Hydratationskräfte) grösser als die des Gitters sind, zerfällt der Kristall und geht in Lösung, wobei sich die Ionen mit H₂O-Molekülen (Hydrathülle) umgeben. Mit steigendem Verbrauch an H₂O-Molekülen verlangsamt sich dieser Prozess, bis die Lösung gesättigt ist. Eine weitere Auflösung ist in der Regel nur durch Temperaturerhöhung möglich.

	Löslichkeit
leicht lösliche Stoffe	> 100 g/l
mässig lösliche Stoffe	20–100 g/l
schwer lösliche Stoffe	1–20 g/l
sehr schwer lösliche Stoffe	0,1–1 g/l
praktisch unlösliche Stoffe	< 0,1 g/l

Interessant ist hier, dass das bekannte Kalziumsulfat maximale Sulfatkonzentrationen SO₄ von ca. 1200 mg/l verursachen kann (Muschelkalkwasser). Höhere Sulfatkonzentrationen (> 1200 mg SO₄) deuten auf die Beimischung von stärker mineralisierten Tiefengrundwässern (NaSO₄, NaCl) hin.

Die Löslichkeit von Gasen

Die Löslichkeit von Gasen (O₂, N₂, CO₂ usw.) hängt vom Druck, bei Gas-Gemischen vom Partialdruck, und von der Temperatur ab. Nach dem Henry-Dalton'schen Gesetz ist die Löslichkeit (λ) von Gasen (die nicht mit dem Wasser reagieren, wie z.B. N₂)

$$\lambda = K \cdot p \text{ (l/l)}$$

wobei p der Druck bzw. Partialdruck und K ein temperaturabhängiger Proportionalitätsfaktor sind (Zahlenwerte sind Tabellenwerte

zu entnehmen, z.B. D'Ans und Lax 1967). Bei konstantem K nimmt die Löslichkeit mit dem Druck zu. Daher wird aus der Tiefe aufsteigendes Wasser beim Aufsteigen, d.h. mit fallendem hydrostatischem Druck, entgasen. Die Löslichkeit von Gasen hängt ferner von der Temperatur ab, und zwar nach der Gay-Lussacschen Beziehung

$$\lambda = a \left(1 - \frac{T}{273}\right)$$

T = Temperatur in Kelvin

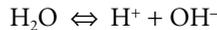
d.h. sie nimmt mit steigender Temperatur ab. Sie wird ferner geringer, wenn Feststoffe im Wasser gelöst sind. So kann Wasser mit einer Temperatur von 15 °C unter 1 bar Druck bei einem Chlorid-Anteil von 0 mg/l maximal 10,5 g/l gelösten Sauerstoff, bei 20'000 mg/l nur noch maximal 8,14 mg/l Sauerstoff enthalten.

Der pH-Wert und sein Einfluss auf die Löslichkeit

Chemisch reines Wasser ist zu einem verschwindend geringen Teil in Hydronium- und Hydroxid-Ionen dissoziiert.



vereinfacht:



In 10⁷ l H₂O ist 1 mol, d.h. ca. 18 g H₂O, in H₃O⁺- (Hydronium-) und OH⁻ (Hydroxid-) Ionen gespalten. Daher sind in 1 l H₂O ca. 19/10⁷ g H₃O⁺-Ionen und ca. 17/10⁷ g OH⁻-Ionen, d.h. 10⁻⁷ mol H₃O⁺-Ionen und 10⁻⁷ mol OH⁻-Ionen enthalten. Das Produkt von H₃O⁺-Ionen- und OH⁻-Ionenkonzentration ist nach dem Massenwirkungsgesetz konstant:

$$K_w^2 = \frac{c(\text{H}_3\text{O}^+) \cdot c(\text{OH}^-)}{c^2(\text{H}_2\text{O})}$$

Wegen des geringen Dissoziationsgrades kann das Konzentrationsglied $c^2(\text{H}_2\text{O})$ praktisch als konstant angesehen und das Produkt $K_w^2 \cdot c^2(\text{H}_2\text{O})$ nach Auflösung obiger Gleichung zur Konstanten K_w zusammengefasst

Stoff	0 °C	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C	100 °C
CaCl ₂ · 6H ₂ O	603	650	745								
CaCl ₂				1020							
CaCl ₂ · 2H ₂ O						1323	1368	1417	1470	1527	1590
CaSO ₄ · 2H ₂ O	1,76	1,925	2,036	2,10	2,122						
CaSO ₄											0.67
Ca(HCO ₃) ₂	162		166		171		175		180		184
CaNO ₃ · 4H ₂ O	1010	1153	1270		196						
Ca(NO ₃) ₂ · 3H ₂ O						282					
KCl	282	313	344	373	403	431	456	483	510	534	562
K ₂ SO ₄	74	92	112	129	148	165	182	198	213	228	241
K ₂ CO ₃ · 1,5H ₂ O	1073	1090	1115	1140	1170	1212	1270	1331	1400	1475	1560
KNO ₃	133	215	315	456	639	857	1099	1380	1680	2020	2452
MgCl ₂ · 6H ₂ O		535	543	553	565	587	607		686		727
MgSO ₄ · 7H ₂ O		301	356	408	454						
MgSO ₄ · 6H ₂ O							544				
MgSO ₄ · 1H ₂ O									515	(480)	
Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	639		705		818		937		1109		
Mg(NO ₃) ₂ · 2H ₂ O							2145		2330		2640
NaCl · 2H ₂ O	356										
NaCl		357	359	362	364	367	371	375	385	387	392
Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	46	91	191	409							
Na ₂ SO ₄ · (10H ₂ O)					481						
Na ₂ SO ₄						466	453		431		423
Na ₂ CO ₃ · 10H ₂ O	69	120	216	397							
Na ₂ CO ₃ · 1H ₂ O					489	474	462	452	445	445	445
NaNO ₃		707		880		1049		1247		1480	1760

Tab.2: Löslichkeit einiger Salze (wasserfreier Stoff in 1000 g H₂O) bei verschiedenen Temperaturen (nach Vogel 1956, aus Matthes 1973, geändert).

werden. Diese stellt das Ionen-Produkt des Wassers dar

$$c(\text{H}_3\text{O}^+) \cdot c(\text{OH}^-) = K_w,$$

das bei 22 °C $K_w = 10^{-7} \cdot 10^{-7} = 10^{-14}$ mol/l beträgt.

Erhöht sich durch Zugabe einer Säure, d.h. eines Protonendonators, zum reinen Wasser die H₃O⁺-Konzentration, so wird das Produkt aus H₃O⁺-Konzentration und OH⁻-Konzentration den gleichbleibenden Wert von 10⁻¹⁴ behalten. Als pH-Wert wird der vorzeichenlose negative Exponent der Hydroniumionen-Konzentration (auch Wasserstoffionen-Konzentration genannt) bezeichnet. Der pH-Wert beträgt somit bei einer:

$$\begin{aligned} \text{neutralen Lösung:} & \quad \text{pH} = 7 \\ \text{sauren Lösung:} & \quad \text{pH} < 7 \\ \text{basischen Lösung:} & \quad \text{pH} > 7 \end{aligned}$$

Die genaue Messung des pH-Wertes erfolgt entweder elektrometrisch oder mittels Indikatoren, das sind säuren- und basenempfindliche Farbstoffe. Die Messung mit einem *elektronischen pH-Wert-Messer* ergibt sehr genaue Werte, diejenige mit *Indikatorpapieren* (farbstoff-getränktes Papier) erreicht Genauigkeiten bis ± 0,1.

In *natürlichen Wässern* liegt der pH-Wert im Allgemeinen zwischen 4 und 9. Er beeinflusst die Löslichkeit vieler Salze und deren Ionen-Konzentration im Grundwasser. In der Folge sind nur wenige Ionen, wie K⁺, Na⁺, NO₃⁻ und Cl⁻ in fast allen pH-Bereichen gleich gut löslich. Die Löslichkeit von Ionen der meisten Metalle wird dagegen vom pH-Wert bestimmt.

Elektrische Leitfähigkeit

Während die Lösungen von Nichtelektrolyten, zu denen die Mehrzahl organischer Verbindungen – mit Ausnahme organischer Säuren und ihrer Salze – gehört, elektrisch nicht leitend sind, machen Ionen das Wasser elektrisch leitfähig. Die elektrische Leitfähigkeit ist definiert als der reziproke Wert des elektrischen Widerstandes (R)

$$G = \frac{1}{R}$$

Die Einheit der Leitfähigkeit ist das Siemens ($S = 1/\Omega$) bzw. das Mikrosiemens (μS).

Die spezifische elektrische Leitfähigkeit K des Wassers wird durch die *Widerstandsmessung* an einer Wasserprobe zwischen zwei Elektroden mit der Fläche (A) von jeweils 1 cm^2 und ihrem Abstand (r) von 1 cm bei Gleichstrom-Durchfluss ermittelt. Daraus ergibt sich die gebräuchliche Einheit $\mu S \cdot \text{cm}^{-1}$.

Destilliertes Wasser weist eine Leitfähigkeit kleiner $5 \mu S \cdot \text{cm}^{-1}$ auf. Sie nimmt mit dem Salzgehalt zu, wobei sie sich aus den Leitfähigkeitsteilbeiträgen der Kationen- und Anionen-Anteile zusammensetzt. Man kann näherungsweise die Leitfähigkeit eines Wassers in μS errechnen, indem man die Gesamtmineralisation eines Wassers in mg/l mit dem Faktor 1,3 multipliziert und dadurch in etwa die Leitfähigkeit in $\mu S \cdot \text{cm}^{-1}$ erhält. Solche Berechnungen der Leitfähigkeiten aus einer vorliegenden Wasseranalyse sind zur Überprüfung der Analysenberechnungen äusserst hilfreich. Man kann auf diese Weise feststellen, ob Hauptbestandteile nicht erfasst wurden oder sogar grobe Fehler in der Analyse vorliegen.

Guillerd (1941) multipliziert die Massenkonzentrationen der verschiedenen Ionen (mg/l) mit folgenden Faktoren zur Bestimmung ihrer Leitfähigkeiten:

Ca^{2+}	$0,387 \cdot 10^{-5}$
Mg^{2+}	$0,55 \cdot 10^{-5}$
K^+	$0,248 \cdot 10^{-5}$
Na^+	$0,27 \cdot 10^{-5}$
Cl^-	$0,27 \cdot 10^{-5}$
SO_4^{2-}	$0,155 \cdot 10^{-5}$
CO_3^{2-}	$0,2 \cdot 10^{-5}$

Das Mittel der Kationen- und Anionen-Summen der Leitfähigkeiten entspricht der elektrischen Leitfähigkeit der untersuchten Wasserprobe.

Die elektrische Leitfähigkeit nimmt als Funktion der Ionen-Beweglichkeit mit steigenden Temperaturen zu und mit fallenden ab, wobei die Änderung ca. $2\%/1^\circ \text{C}$ beträgt. Die nachstehend aufgeführten Wasserarten besitzen folgende Leitfähigkeiten:

Regenwasser	$5\text{--}30 \mu S \cdot \text{cm}^{-1}$
Tiefengrundwasser	$1'000\text{--}20'000 \mu S \cdot \text{cm}^{-1}$
Grundwasser	$30\text{--}2'000 \mu S \cdot \text{cm}^{-1}$
Meerwasser	$> 10'000 \mu S \cdot \text{cm}^{-1}$

Oxidation und Reduktion

Ein weiterer wichtiger Vorgang im Grundwasser betrifft die Oxidation und Reduktion. Darunter versteht man nicht nur chemische Vorgänge unter Beteiligung des Sauerstoffes, sondern allgemein den Wechsel von Ladungen im Reaktionsverlauf. Eine Oxidation entspricht einer Abgabe, eine Reduktion einer Aufnahme von Elektronen. Dazu gehört auch der Wechsel von Ionen-Ladungen.

Bei solchen Ionen-Reaktionen bilden sich elektrochemische Potentiale, d.h. Spannungsdifferenzen. In einer Lösung, die Ionen verschiedener Oxidationsstufen führt, wird das *Redox-Potential* als elektrisches Potential in mV oder V zwischen zwei Elektroden gemessen. Als willkürlich festgelegte Bezugsgrösse gilt die Wasserstoff-Elektrode mit dem Potential Null, auf die alle anderen Potentiale bezogen werden. Die Metalle lassen sich aufgrund ihrer unterschiedlichen Potentiale gegenüber Wasserstoff in einer vom Li (Lithium) bis Au (Gold) reichenden Spannungsreihe ordnen (Tabelle 3), in welcher die gegenüber dem zwischen Fe und Sn eingeordneten Wasserstoff negativ wirksamen Metalle diesen aus seinen Lösungen zu verdrängen vermögen, d.h. solche Metalle werden in sauren Lösungen aufgelöst. Das zunehmend oxidierende Potential ist der Zunahme der negativen Werte proportional, das reduzierende ihrer Abnahme. Aus diesem Grunde wirken die Metalle höheren (negati-

Li (I) - 3,05 V	Zn (II)..... - 0,76 V	H (I)..... + 0,00 V
K (I)..... - 2,93 V	Fe (II)..... - 0,41 V	Sn (IV) + 0,05 V
Ca (II)..... - 2,87 V	Cd (II)..... - 0,40 V	Cu (II)..... + 0,35 V
Ba (II)..... - 2,80 V	Co (II)..... - 0,28 V	Ag (I)..... + 0,80 V
Na (I)..... - 2,71 V	Ni (II)..... - 0,23 V	Pb (IV) + 0,80 V
Mg (II)..... - 2,37 V	Sn (II)..... - 0,14 V	Hg (II)..... + 0,85 V
Al (III)..... - 1,66 V	Pb (II)..... - 0,13 V	Pt (II)..... + 1,20 V
Mn (II)..... - 1,19 V	Fe (III)..... - 0,04 V	Au (III) + 1,50 V

Tab. 3: Übersicht über die Normal-Potentiale der wichtigsten Metalle.

ven) Potentials als Oxidationsmittel gegenüber denjenigen niedrigen Potentials. Dagegen reduziert ein Metall niedrigen (negativen) Potentials solche höheren Potentials. Derartige Redox-Potentiale gelten auch für die Ionen oder Moleküle verschiedener Elemente (Tabelle 4). Die Löslichkeit von Stoffen ist – ausser vom pH-Wert – auch von ihrer Oxidationsstufe abhängig und damit vom Redox-Potential der Lösung, so z.B. bei den Metallen Fe, Mn, Ca, V und U.

Redox-System	E in Volt
$Mn^{2+} = Mn^{3+} + e$	- 1,510
$2H_2O = O_2 + 4H^+ + 4e$	- 1,229
$NO + 2H_2O = NO_3^- + 4H^+ + 4e$	- 0,940
$N_2O_4 + 2H_2O = 2NO_3^- + 4H^+ + 2e$	- 0,800
$Fe^{2+} = Fe^{3+} + e$	- 0,771
$S + 3H_2O = H_2SO_3 + 4H^+ + 4e$	- 0,450
$4OH^- = O_2 + 2H_2O + 4e$	- 0,401
$H_2SO_3 + H_2O = SO_4^{2-} + 4H^+ + 2e$	- 0,170
$Mn(OH)_2 + OH^- = Mn(OH)_3 + e$	- 0,100
$NO_2^- + 2OH^- = NO_3^- + H_2O + 2e$	- 0,010
$H_2 = 2H^+ + 2e$	0,000
$S^{2-} = S + 2e$	+ 0,480
$Fe(OH)_2 + OH^- = Fe(OH)_3 + e$	+ 0,560

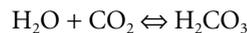
Tab. 4: Redox-Potentiale E verschiedener Stoffe (nach Latimer 1952, Schoeller 1962, aus Matthes 1973, geändert).

Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht

(vgl. dazu auch das Kapitel Versinterungsbildung – Versinterungsverhinderung)

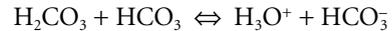
Mischt sich Kohlendioxid zum Wasser, z.B. in Niederschlägen (CO_2 aus der Luft), so wird Kohlendioxid gelöst.

Die Löslichkeit ist druck- und temperaturabhängig. Bei 20 °C und 1 bar kann 1 Liter Wasser 1688 mg CO_2 aufnehmen, bei 25 bar 32'200 mg. Zirka 1% des im Wasser gelösten Kohlendioxids setzt sich mit dem Wasser zur (schwachen) Kohlensäure um.

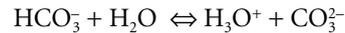


Die Kohlensäure dissoziiert in Hydrogenium- sowie in Karbonat- und Hydrogenkarbonat-Ionen:

1. Dissoziationsstufe:



2. Dissoziationsstufe:

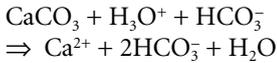


Da CO_2 nur wenig Neigung hat, mit H_2O nach dem vorstehenden Ablauf zu reagieren, enthält Wasser rund 99% molekular gelöstes CO_2 , die sogenannte «freie Kohlensäure», und nur etwa 1% dissoziierte Kohlensäure. Zwischen CO_2 , CO_3^{2-} und HCO_3^- besteht ein druck- und temperaturabhängiges Gleichgewicht nach der Beziehung:

$$K_K = \frac{c(CO_2) \cdot c(CO_3^{2-})}{c(HCO_3^-)}$$

Auf seinen Sickerwegen zum Grundwasser oder im GW-Leiter greift das kohlen-säurehaltige Wasser kalkhaltige Gesteine oder Kalksteine an. Kalkstein ($CaCO_3$) ist nur gering wasserlöslich (15 mg $CaCO_3$ /l bei 20 °C). Mit steigendem CO_2 -Gehalt nimmt die Löslichkeit zu. Ein mit Kohlensäure gesättigtes Wasser löst ca. 165 g/l Kalziumkarbonat, also 13'000 mal mehr als reines Wasser. Die Auflösung von Kalk unter Bildung von

Hydrogenkarbonat geschieht nach folgendem Schema:



Die Löslichkeit des Kalziumkarbonats wird durch das sogenannte Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht (oder auch TILLMAN-SCHES GESETZ) bestimmt.

- $c(\text{CO}_2) = K \cdot c^2(\text{HCO}_3^-) \cdot c(\text{Ca}^{2+})$
- $c(\text{CO}_2)$ = Konzentration des im Wasser gelösten CO_2 , d.h. der sogenannten «freien Kohlensäure»
- $c(\text{HCO}_3^-)$ = Konzentration von HCO_3^- , berechnet als «halbgebundene Kohlensäure» in mmol/l
- $c(\text{Ca}^{2+})$ = Konzentration der Kalzium-Ionen (Erdalkali-Ionen) in mmol/l
- K = temperatur- und druckabhängige Tillmans-Konstante

Daneben gibt es eine Vielzahl weiterer Parameter, die das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht ganz entscheidend beeinflussen können. Nachfolgend die wichtigsten in Kürze:

pH-Wert:

$$\text{pH}_{\text{Sättigung}} = \text{pK}^* \cdot \lg C_{\text{Ca}^{2+}} - \lg C_{2\text{HCO}_3^-} + \lg f_{\text{fl}}$$

pK^* = temperaturabhängige Langelier-Konstante

$\lg f_{\text{fl}}$ = Langelier-Korrekturfaktor in Abhängigkeit von der Ionenstärke (mmol/l)

[Wertetabellen kann der Leser dem Buch Hydrogeologie, B. Hölting entnehmen.]

Die obige Gleichung sagt, dass bei einem vorgegebenen Wasser (pK^* ; $\lg f_{\text{fl}}$) der vorhandene pH-Wert die Kalklöslichkeit bestimmt. Eine Erhöhung des pH-Wertes führt zur Ausfällung des gelösten Kalkes aus dem Wasser. Erreicht der pH-Wert die kritische Grenze von 10, so ist kein Kalk mehr vorhanden. Diese Gesetzmässigkeit führt zu den bekannten, massiven Versinterungen bei Betonbauwerken. Dabei vollzieht sich die Ausfällung nicht spontan, sondern kann sich über einen langen Zeitraum resp. eine lange Fließstrecke hinaus-

zögern, sodass auch Bergwässer mit höheren pH-Werten (11–12) immer noch Ablagerungen verursachen können.

Einfluss von Fremdionen:

In natürlichen Wässern treten neben dem System $\text{CO}_2\text{--H}_2\text{O--CaCO}_3$ stets auch Fremdionen auf.

Es gilt grundsätzlich, dass bei einer gesättigten Lösung eines wenig löslichen Salzes die Zugabe eines anderen, leichter löslichen ohne gemeinsames Ion mit dem ersten dessen Löslichkeit erhöht. Die Zugabe von 0,1% NaCl bewirkt beispielsweise eine Zunahme des $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ von 10 bis 25%.

Temperatur:

Mit zunehmender Temperatur und gleichbleibendem pCO_2 nimmt die Löslichkeit der Erdalkal karbonate ab. Einerseits sinkt die gelöste CO_2 -Menge, andererseits steigt das erforderliche $\text{CO}_{2\text{eq}}$.

Bei jedem Sinken der Temperatur wird in einem Gleichgewichtswasser CO_2 für die Kalklösung neu verfügbar: sog. Abkühlungskorrosion.

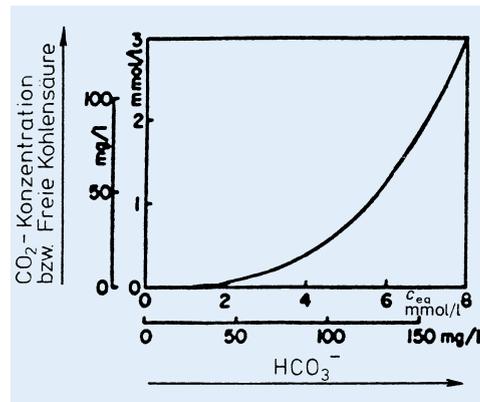


Abb. 3 : Kurve des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtes. Sie trennt das freie zugehörige CO_2 (unter der Kurve) vom freien aggressiven CO_2 (über der Kurve). Im Gleichgewicht stehen solche Wässer, deren CO_2 und HCO_3^- -Ionenkonzentrationen auf der Kurve liegen (aus Axt 1962, geändert).

Ausgangs- konzentration CaCO ₃ ppm	Zusätzlich lösbare Menge an CaCO ₃ (ppm) bei Abkühlung von				
	6 auf 0 °C	10 auf 6 °C	15 auf 10 °C	20 auf 15 °C	24 auf 15 °C
120	1,0	0,9	1,2	1,5	2,8
160	2,3	1,9	2,7	3,2	6,3
200	4,2	3,5	5,0	5,9	11,4
240	6,9	5,7	8,1	9,6	19,2
280	10,3	8,5	12,0	14,3	27,1

Tab. 5: Bei Abkühlung zusätzlich lösbare Kalkmenge nach Bögli (1964a, S. 88). Die Zahlen sind Näherungswerte unter Berücksichtigung des jeweiligen CO_{2,eq}.

Druck:

Bei der Abwesenheit von Gasblasen ändert sich das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht erst ab einem Druck von > 25 bar.

Anders liegt der Fall bei geschlossenen Gasblasen, denn es gilt $V \cdot p = \text{konst.}$, daher $V_1 : V_2 = p_2 : p_1$. In 10 m Wassertiefe herrscht ein Druck von 2 bar, in der Folge sinkt das Volumen der Gasblase auf die Hälfte. Damit steigt der Partialdruck p_{CO_2} auf das Doppelte und es kommt zu einer Kalkauflösung im Bereich der Luftblase.

Härte des Grundwassers

Die Gehalte an Erdalkalimetall-Ionen (Ca²⁺, Mg²⁺, Ba²⁺, Sr²⁺) bestimmen die «Härte» eines Grundwassers; je höher die Konzentrationen an diesen Ionen sind, um so grösser ist die Wasserhärte. Sie bewirkt beispielsweise, dass beim Waschen die Seife nur ungenügend schäumt, da die Erdalkalimetall-Ionen mit Seifen, d.h. löslichen Alkalimetall-Salzen der Palmitin-, Stearin- und Ölsäuren, unlösliche Salze dieser Säuren bilden; ein Schäumen der Seife tritt erst dann auf, wenn alle Erdalkalimetall-Ionen ausgefällt sind. Die Wasserhärte gehört daher zu den bei Routine-Untersuchungen von Grundwässern wohl am häufigsten ermittelten Werten. Hier liegt auch der Grund dafür, dass Meerwasser (sehr hohe «Härte») in Verbindung mit Seife nicht schäumt.

1 Deutscher Grad (1 °d) entspricht dem Gehalt von 10 mg CaO bzw. 7,14 mg Ca²⁺ in 1 l Wasser, das sind 0,179 mmol Ca²⁺/l H₂O. Die Problematik dieser Definition, die zu-

dem keine gesetzliche Einheit ist, besteht darin, dass sämtliche Erdalkali-Ionen als CaO erfasst werden und dass CaO ein Stoff ist, der im Wasser selbst nicht enthalten sein kann. Die entsprechenden Werte in Deutschland und Frankreich sind:

1 °d (deutsch) = 10 mg/l CaO entspricht
7,14 mg/l Ca = 0,179 mmol/l Ca

1 °f (franz.) = 10 mg/l CaCO₃ entspricht
4,0 mg/l Ca = 0,1 mmol/l Ca

Im Grundwasser ist der überwiegende Teil der in Lösung befindlichen Erdalkalimetall-Ionen an Hydrogenkarbonat- und/oder Sulfat-Ionen, in geringem Mass auch an Chlorid-, Nitrat- und Phosphat-Ionen gebunden.

In Anbetracht des verschiedenen chemischen Verhaltens und der unterschiedlichen technischen Bedeutung dieser Verbindungen wird in der Praxis zwischen drei verschiedenen Härten unterschieden:

- Unter der **Gesamthärte** versteht man den Gehalt an Erdalkalien (CaO + MgO), weil deren Verbindungen schwer wasserlöslich sind und beim Erwärmen meist als Karbonate ausfallen; zu den Gesamthärtebildnern gehören nicht die übrigen Erdalkalien.

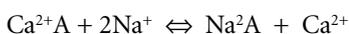
- Unter **Karbonat-Härte** versteht man den Gehalt an Hydrogenkarbonaten (HCO₃⁻) wenn vorhanden, auch Karbonate (CO₃²⁻) aller Kationen, insbesondere der Erdalkalien und Alkalien. Diese Härte wird auch als «vorübergehende» oder «temporäre» Härte bezeichnet, da beim Erwärmen des Wassers das Hydrogenkarbonat zu Karbonat zerfällt und die den Hydrogenkarbonat-Ionen zugeordneten Ca²⁺- und Mg²⁺-Ionen in Form unlöslicher Karbonate ausfallen.

• Die Nichtkarbonat- (oder Mineral-) Härte bildet die Differenz zwischen der Gesamthärte und der Karbonat-Härte, erfasst also nur jenen Teil der Erdalkalimetall-Ionen, die SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- oder PO_4^{3-} -Ionen zugeordnet sind und sich deshalb nicht durch einfaches Erhitzen entfernen bzw. ausfällen lassen. Die Nichtkarbonat-Härte wird deshalb auch «bleibende» oder «permanente» Härte genannt. Sie ist eine Rechengrösse und wird meist nicht mehr angegeben.

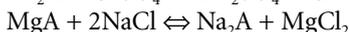
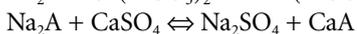
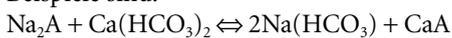
Für die Qualifikation eines Grundwassers hinsichtlich seiner Härte werden nach Klut-Olszewski (1945) in der Regel folgende Härte-Stufen verwandt:

Gesamthärte d°H	mmol/l Härte-Äquivalent	
< 4	< 1,43	sehr weich
4– 8	1,43–2,68	weich
8–12	2,68–4,28	mittelhart
12–18	4,28–6,42	ziemlich hart
18–30	6,42–10,72	hart
> 30	> 10,72	sehr hart

Der Ionen-Austausch kann als eine besonders wirksame Sorption betrachtet werden. Er beruht auf der Fähigkeit, verschiedener Stoffe, wie z.B. Glimmer, Zeolithe, Tonminerale, insbesondere Montmorillonit, Eisen-, Mangan- und Aluminiumhydroxide, Humusstoffe, bestimmte Ionen, aus einer Lösung herauszunehmen und anzulagern bzw. in ihr Kristallgitter einzubauen sowie als Ausgleich eine äquivalente Menge andersartiger Ionen an das Grundwasser abzugeben. Die Austauschvorgänge zwischen den im Wasser gelösten und den im Austausch gebundenen Ionen sind umkehrbar. Zwar werden von diesem Vorgang sowohl Anionen als auch Kationen betroffen, eine wesentliche Rolle spielt jedoch nur der Kationen-Austausch nach folgendem Schema (A = Ionen-Austauscher):



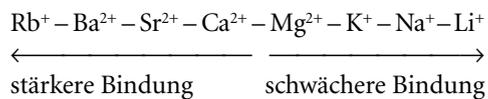
Beispiele sind:



Die Richtungen, in denen diese Vorgänge verlaufen, sind von der Konzentration der Lösungen abhängig, während der Umfang und die Schnelligkeit im Wesentlichen durch die Art und Beschaffenheit, insbesondere durch die Partikelgrössen, d.h. die Reaktionsoberfläche, der Ionen-Austauscher bestimmt werden.

Als Ionenaustausch-Kapazität wird üblicherweise die Äquivalentmenge an austauschbaren Ionen in mmol pro 100 g (= hg) fester Substanz bei einem pH-Wert von 7,0 angegeben. Die Tabelle 6 zeigt die Austausch-Kapazitäten verschiedener Gesteine und Substanzen.

Die Festigkeit, mit der die verschiedenen Kationen an die Austausch-Substanz gebunden werden, ist unterschiedlich. Unter gleichen Bedingungen wird die Bindungsintensität um so grösser, je höher die Wertigkeit eines Kations ist und je schwerer es aus der Austausch-Substanz zu verdrängen ist. Die Austausch-Bereitschaft nimmt in den nachstehenden Reihen von links nach rechts zu.



So wird z.B. das Na^+ -Ion durch alle links von ihm stehenden Ionen aus der Austausch-Substanz verdrängt, während es selbst nur das Li^+ -Ion verdrängen kann.

Die genauen Kenntnisse über diese Vorgänge erlauben es, Wasseranalysen und deren Zusammensetzung zurückzuverfolgen und zu beurteilen. Dies ist insbesondere dort notwendig, wo Wasserproben unter erschwerten Bedingungen (Baustellen, z.B. Vortriebsbereiche einer TBM) entnommen und nachfolgend analysiert werden müssen, denn häufig verursachen die verwendeten Baustoffe massive Veränderungen im Charakter und der Zusammensetzung einer Wasserprobe. So besitzen beispielsweise zementgebundene Baustoffe die Eigenschaft, die im Bergwasser verfügbaren Mg-Ionen in Kürze gegen Ca-Ionen auszutauschen. Die quantitative und qualitative Beurteilung dieser Einflüsse ist deshalb nicht immer einfach, aber anhand einer kurzen Checkliste möglich.

	für Kationen	für Anionen	
	nach Grim (1968)	nach Caroll (1959)	nach Grim (1968)
Talk	–	0,2	–
Basalt	–	0,5–2,8	–
Bimstuff	–	1,2	–
Tuff	–	32,0–49,0	–
Quarz	–	0,6–5,3	–
Feldspat	–	1,0–2,0	–
Kaolinit	3–15	–	6,6–13,3
Kaolinit (kolloidal)	–	–	20,2
Nontronit	–	–	12,0–20,0
Saponit	–	–	21,0
Beidellit	–	–	21,0
Pyrophyllit	–	4,0	–
Halloysit 2H ₂ O	5–10	–	–
Illit	10–40	10–40	–
Chlorit	10–40	10–40 ?	–
Tonsteine	–	10–41,0	–
Glaukonit	–	11–20	–
Sepiolit-Attapulgit-Palygorskit	3–15	20–30	–
Halloysit 4H ₂ O	40–50	–	–
Allophan	25–50	≈ 70	–
Montmorillonit	80–150	70–100	23–31
Silicagel	80–150	80	–
Vermiculit	100–150	100–150	4
Zeolithe	100–130	230–620	–
Leucit	–	460	–
Nosean	–	880	–
Sodalith	–	920	–
Cancrinit	–	1090	–
Organische Substanz des Bodens und rezenter Sedimente	150–500	–	–

Tab. 6: Ionenaustausch-Kapazitäten verschiedener Minerale und Gesteine (Äquivalentmenge an austauschbaren Ionen in mmol je 100 g feste Substanz [aus Matthes, verändert]).

Biologische Vorgänge

Die Grundwasser-Beschaffenheit wird durch biologische Vorgänge unmittelbar und mittelbar beeinflusst. Der mit Grundwasser erfüllte Raum ist der Lebensbereich für eine Reihe von ein- und mehrzelligen *Mikroorganismen*, die Wasser-Inhaltsstoffe bei ihrem Stoffwechsel nutzen und ihre Stoffwechselprodukte an das Grundwasser abgeben. Im Grundwasser sind im wesentlichen drei Gruppen von Mikroorganismen verbreitet: *Bakterien*, die ebenfalls zu den Bakterien gehörenden *Aktinomyzeten* (Schlegel 1976) und *Pilze*. Bakterien werden noch in Wasser-

tiefen von 2700 m bei Drücken von ca. 300 bar nachgewiesen.

Unmittelbare Veränderungen der GW-Beschaffenheit werden verursacht durch bakteriellen Abbau organischer Verbindungen mit Bildung von organischen Säuren und CO₂, durch *Sulfat-Reduktion* unter anaeroben Bedingungen ($8H + SO_4^{2-} + H_2S + 2H_2O + 2OH^-$) mit Bildung von Schwefelwasserstoff oder sogar elementarem Schwefel sowie durch unter den gleichen Bedingungen erfolgenden Abbau von Nitrat. Die *Nitrat-Reduktion* (Denitrifikation) – ein aus Sicht des Umweltschutzes bedeutsamer Mechanismus – wird nicht nur durch anaerobe Bakterien,

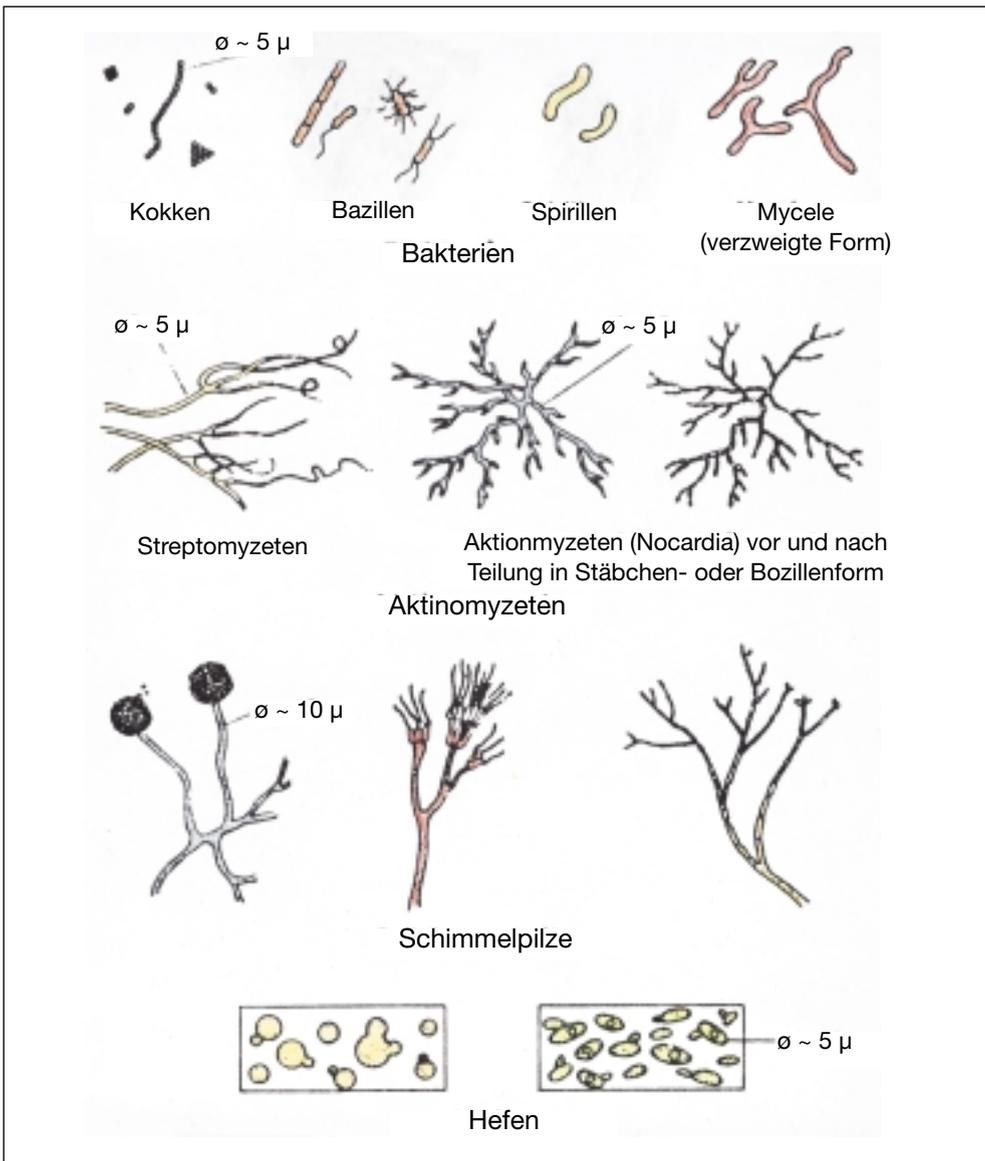


Abb. 4: Wichtige Mikroorganismen im Untergrund (aus Davis 1967).

sondern auch durch Streptomyzeten und andere Pilze hervorgerufen. Die Mikroben reduzieren im sauerstoffarmen Milieu zunächst Nitrat zu Nitrit, das dann weiter bis zum gasförmigen elementaren Stickstoff abgebaut wird, der in die Bodenzone über der GW-Oberfläche entweicht. Er kann sich dabei unter undurchlässigen Schichten sammeln und entweicht erst bei Bohrungen. Andere Bakte-

rien bilden aus Nitrit durch Reduktion Ammonium-Ionen (NH_4^+).

Durch aerobe Bakterienarten können Sulfide zu Sulfat umgebildet (Bildung von Schwefelsäure) sowie durch Stickstoff-Bakterien Ammonium-Ionen und Nitrit zu Nitrat oxidiert werden. Auch die Lösungs- und Fällungsvorgänge von Eisen- und Mangan-Verbindungen, die vom Redox-Potential und

dem pH-Wert des Grundwassers abhängen, vollziehen sich weitgehend unter Beteiligung von Mikroorganismen; sie sind bei Oxidations-Reduktions-Prozessen häufig als Katalysatoren beteiligt. So liegt beispielsweise Eisen in sauerstoffreichem Milieu fast immer als nahezu unlösliche Fe(III)-Verbindung vor. Bei Anwesenheit organischer Stoffe, die von Bakterien verzehrt werden, wird das 3wertige Eisen zur wasserlöslichen 2wertigen Form reduziert. Das für diesen Vorgang anaerobe Milieu entsteht durch die Sauerstoffzehrung der Bakterien, die somit katalytisch wirken. Andere Bakterien oxidieren 2wertiges zu 3wertigem Eisen.

Mikroorganismen im Grundwasser bauen organische Substanzen, insbesondere Kohlenwasserstoffe ab. Auf solche biologische Vorgänge geht ein wesentlicher Teil des Selbstreinigungsvermögens von Grundwässern zurück, die mit organischen Substanzen belastet wurden. Sogar ausgelaufenes Öl oder Benzin wird mit der Zeit durch Mikroorganismen abgebaut und beseitigt. Gleiches gilt auch für Tenside, Pestizide (chlorierte Kohlenwasserstoffe), aromatische Nitroverbindungen und Humusstoffe. Beim biologischen Abbau spielen insbesondere auch Sorptionsvorgänge an den mikrobiellen Schleimen sowie Mikroorganismen selbst eine Rolle.

Die mikrobiellen Umsetzungen können durch das Eindringen toxischer Substanzen in das Grundwasser gehemmt oder für längere Zeit unterbunden werden. Zu diesen gehören insbesondere Schwermetall-Ionen, Kohlenwasserstoffe wie Benzin, Phenole und Cyanide. Hohe Salzgehalte beeinträchtigen dagegen die mikrobielle Aktivität verhältnismässig wenig, da sich die Mikroflora dem Biotop anzupassen versteht.

Wiedergabe der Analyseergebnisse

Zur Wiedergabe der Analyseergebnisse von hydrologischen Untersuchungen wurden sehr viele verschiedene graphische Darstellungsmethoden entwickelt und verfeinert (vgl. Abb. 5).

Sie lassen sich in drei Gruppen einteilen:

- **Einzeldiagramme** zur Wiedergabe der Ergebnisse einer einzelnen Wasserprobe

- **Sammeldiagramme** zur Wiedergabe mehrerer Proben und zwecks Vergleiche derselben

- **Karten oder flächenhafte Darstellung / Profilschnitte** (*Fachliteratur in Hölting S. 275*)

Umrechnung von mg/l in mmol(eq)/l:

$$\text{mmol(eq)/l} = \frac{\text{Menge [mg/l]}}{\text{Molmasse}} \cdot \text{Wertigkeit}$$

Beispiel: $\text{Ca}^{2+} = 635,9 \text{ mg/l}$

$$\text{mmol(eq)/l} = \frac{635,9 \text{ mg/l}}{40,08} \cdot 2 = 31,7 \text{ mmol(eq)/l}$$

Bei der ersten Gruppe der Einzeldiagramme eignen sich verschiedene Modelle.

Eine optisch gute Darstellung ergeben die Kreisdiagramme, wobei die beanspruchte Fläche z.B. [cm²] proportional zur Konzentration der einzelnen Ionen ist. Dabei ist es dem Verfasser überlassen, welche Ionen er darstellen will und welche nicht.

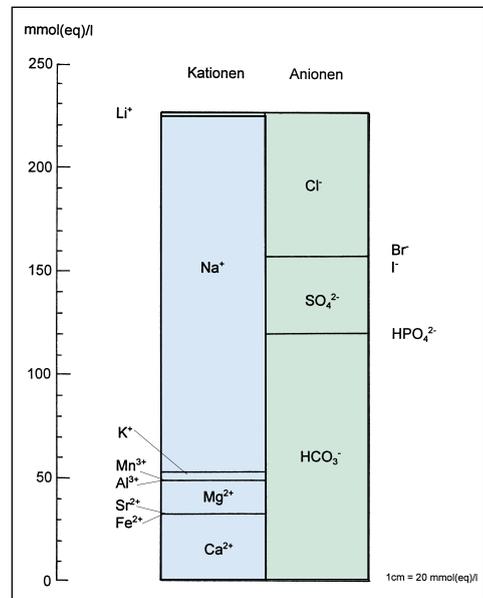


Abb. 5: Darstellung der Analysenergebnisse der Luziusquelle von Tarasp-Schuls-Vulpera in Säulenform. Die linke Säule zeigt die Anionen, die rechte die Kationen. Die Einheit meq/l sollte nur dann verwendet werden, wenn die Säulen dabei gleich hoch werden (Summe Kationen = Summe Anionen), sonst bedient man sich besser der Einheit mg/l.

Eine weitere Möglichkeit zur Darstellung einzelner Wasserproben-Analysen bietet die Darstellung nach Udluft. Dabei steht wiederum ein Kreis in der Mitte der Darstellung. Der Radius des Kreises wird aus dem Gesamtlösungsinhalt in mg/l errechnet. Im oberen Halbkreis werden die Kationen (positiv geladenen Ionen, blaue Farbe), im unteren die Anionen (grüne Farbe), aufgetragen, wobei die Kreisabschnitte in der Grösse entsprechend dem prozentualen Anteil des jeweiligen Ions (in meq/l) eingetragen werden. Der kleinste Kreisabschnitt, der noch eingezeichnet wird, besitzt einen Winkel von 1 gon, was einer Konzentration von 0,5 meq% entspricht (Vollkreis 400 Neugrade = 400 gon). Kleine Gehalte werden als

Striche, deren Länge von der Konzentration abhängt, in den Flächen der chemisch verwandten Ionen angegeben.

Die undissoziierten gelösten Bestandteile CO_2 , H_2S , H_2SiO_3 , H_2TiO_3 , HBO_3 werden in flächentreuer Darstellung in konzentrischen Kreisen aufgetragen. Die namengebenden Ionen, deren Konzentration 20 meq% übersteigt, werden unterstrichen, ebenso das Symbol für CO_2 bei Gehalten über 1 g/l (Säuerling). Thermalquellen werden durch zusätzliche Aussenkreise gekennzeichnet, die jeweils 20 °C bedeuten. Die radioaktiven Bestandteile (Radium und Radon) werden durch konzentrische Halbkreisbogen dargestellt.

Dieses System von UDLUFT ist insofern inkonsequent, weil die Kreisfläche auf die Kon-

Wasseranalyse der Luziusquelle von Tarasp-Schuls-Vulpera

		mg/l	mmol (eq)/l	mmol/l
Mineralbestandteile				
Ammonium	NH_4^+	13,2	0,72	
Lithium	Li^+	9,3	1,34	
Natrium	Na^+	3957,5	172,0	
Kalium	K^+	168,2	4,30	
Kalzium	Ca^{2+}	635,9	31,69	
Strontium	Sr^{2+}	8,9	0,20	
Magnesium	Mg^{2+}	192,9	15,8	
Eisen	Fe^{2+}	6,08	0,22	
Mangan	Mn^{2+}	0,2	0,007	
Aluminium	Al^{3+}	0,6	0,067	
	Summe der Kationen	4991,98	226,3	
Chlorid	Cl^-	2431,70	68,6	
Bromid	Br^-	29,28	0,37	
Iodid	I^-	0,87	0,007	
Sulfat	SO_4^{2-}	1743,7	36,31	
Hydrophosphat	HPO_4^{2-}	0,08	0,002	
Hydrokarbonat	HCO_3^-	7372,7	120,9	
	Summe der Anionen	11'578,33	226,2	
	Total	16'570,31	452,5	
Undissoziierte Stoffe				
Borsäure	HBO_3	597,18		13,63
Kieselsäure	H_2SiO_3	14,77		0,308
Gelöste Gase				
Kohlendioxid	CO_2	2'662,8		60,51

Tab. 7: Analyse Luziusquelle von Tarasp-Schuls-Vulpera.

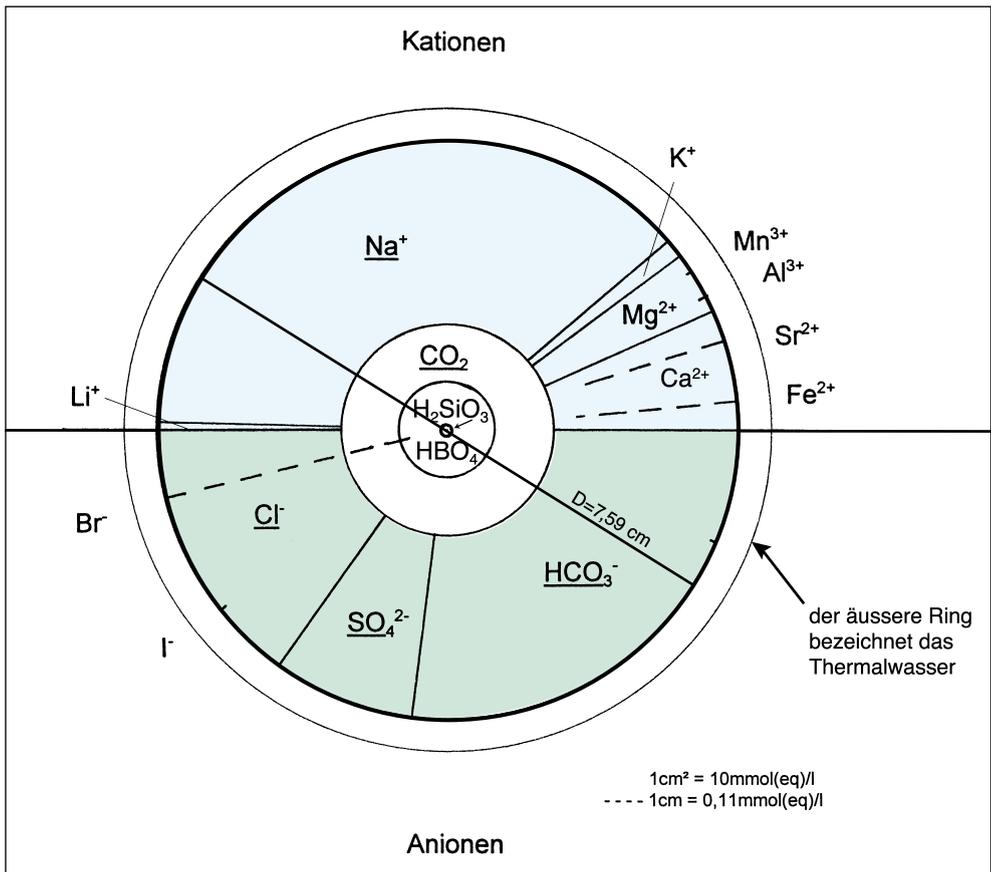


Abb. 6: UDLUFT-Diagramm Luziusquelle. Die Gesamtfläche $\varnothing 7,59$ cm entspricht dem Salzgehalt in $\text{mmol}(\text{eq})/\text{l}$ ($452,5 \text{ mmol}(\text{eq})/\text{l}$) ohne Borsäure, Kieselsäure und natürlichem CO_2 . Ionen werden in $\text{mol}(\text{eq})$ oder meq/l aufgetragen. Die undissoziierten Anteile werden in mmol/l aufgetragen. Die Darstellung zeigt wiederum die Analysenwerte der Luziusquelle (vgl. Tab. 7).

zentration in mg/l und die Grösse der Kreisabschnitte auf die Anteile der Einzelionen in $\text{meq}\%$ bezogen ist. Dieser Mangel kann leicht durch Bezug der Kreisfläche auf die Angabe der Gesamtkonzentration der gelösten Stoffe in meq/l und der undissoziierten Anteile mmol/l behoben werden (so wie in Abb. 6 dargestellt). Die Innenkreise, die die undissoziierten Stoffe wiedergeben, werden dabei kleiner und sie sind u.U. schlechter zu erkennen. Bei entsprechend gewählten Massstäben ändert sich die Darstellung jedoch kaum.

Zur Wiedergabe mehrerer Wasserprobenanalysen in einem einzelnen Diagramm eignen sich PIPER- oder SCHOELLER-Diagramme.

Zur ersten Form der Sammeldiagramme, den sog. SCHOELLER-Diagrammen. Zuerst werden die Kationen und danach die Anionen auf der Abszisse (x-Achse) des Diagramms eingegeben. Die Ordinate (y-Achse) gibt die entsprechenden Konzentrationen im logarithmischen Massstab wieder. Die einzelnen Stoffkonzentrationen einer Wasserprobe werden miteinander verbunden. Parallel zueinander verlaufende Kurven bedeuten gleiche Ionenverteilung, unabhängig von der Konzentration der Wasserprobe (vgl. dazu die Abb. 7).

Piper schlägt bereits 1944 eine Kombination von Dreieck- und Viereckdiagrammen vor, wie sie in Amerika bei Geologen ge-

bräuchlich ist und zunehmend auch in Europa angewandt wird. PIPER-Diagramme sind Verhältnisdarstellungen der Kationen- und Anionengehalte. Hierbei werden zur Untersuchung der Ionen oder Ionengruppen als Funktion der Gesamtkonzentration die Äquivalentprozent (mmoleq%) der Kationen und Anionen ausgewertet. Sie bedingen

deshalb vollständige Analysen der Hauptionengehalte. Zugrunde liegt, dass im gleichseitigen Dreieck die Summe der Lote, gefällt von einem Punkt im Dreieck auf die Dreiecksseiten, gleich der Höhe des Dreiecks ist. Wird die Dreieckshöhe gleich 100 mmol-eq% gesetzt, so lassen sich somit die Konzentrationen von drei Parametern einer Analyse

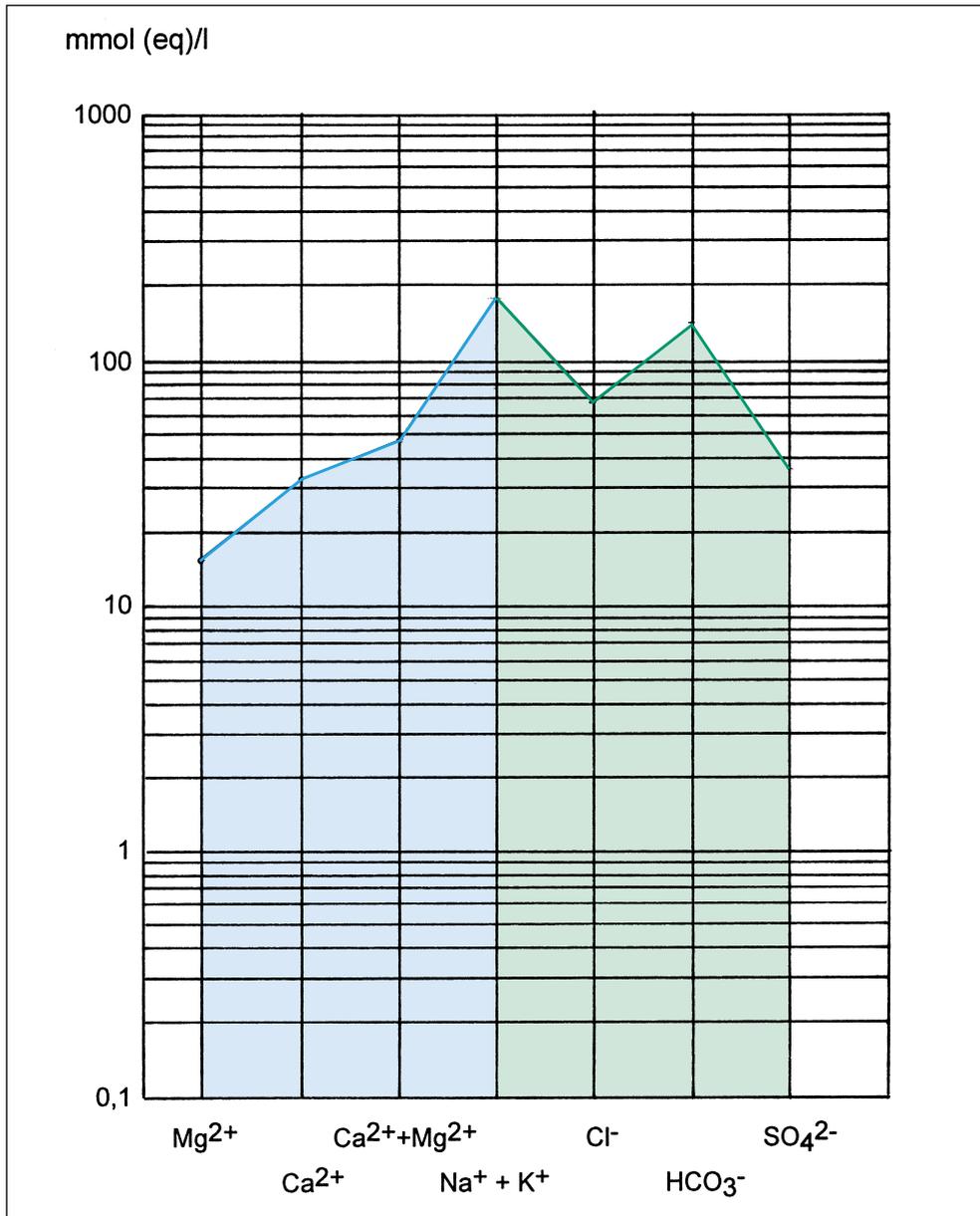


Abb. 7: SCHOELLER-Diagramm Luziusquelle.

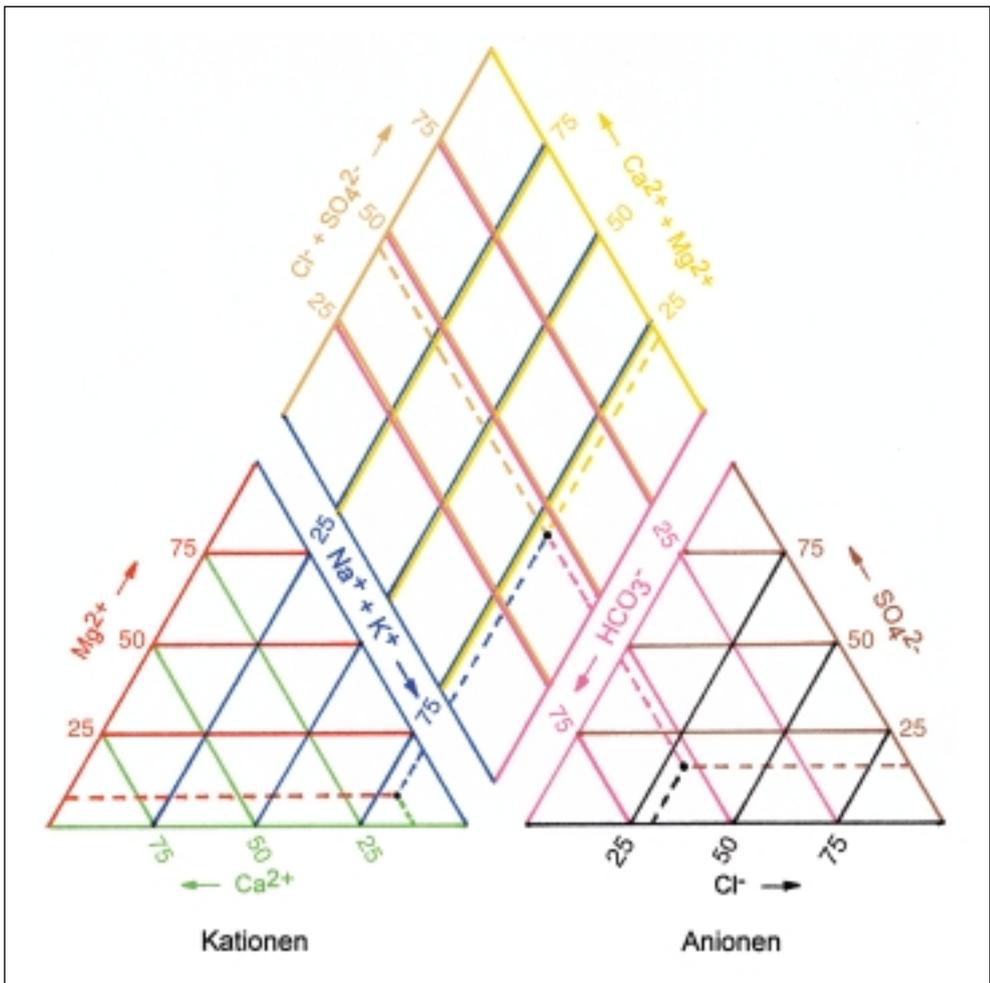


Abb. 8: PIPER-Diagramm Luziusquelle.

durch einen Punkt im Dreiecksdiagramm gleichzeitig darstellen. Jeder der drei Parameter hat an einer Dreiecksspitze seine höchste Konzentration (100 mmoleq%), auf der der Spitze gegenüberliegenden Dreiecksseite die geringste (0 mmoleq%). Es wird also jeweils von der Seite zur gegenüberliegenden Spitze gezählt. Da nur drei Parameter durch diese Darstellungsform erfasst werden können, werden beim PIPER-Diagramm Kationen ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Ca^{2+} , Mg^{2+}) und Anionendreiecke (Cl^- , HCO_3^- , $\text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-$) zusammengefasst und mit einem Viereckdiagramm kombiniert. Das Viereckdiagramm wird zu einer Raute (Rhombus) verzerrt zwischen Katio-

nen- und Anionendreieck gestellt und auf den nebeneinander liegenden Achsen der gleiche Parameter abgegriffen. Jede Analyse wird dann durch je einen Punkt in den drei Diagrammen repräsentiert.

PIPER-Diagramme sind geeignet für die Darstellung mehrerer bis sehr vieler Wasseranalysen. Insbesondere können hierbei durch die statistische Häufung von Punkten eine Zusammenfassung von geochemisch ähnlichen Grundwässern vorgenommen oder verschiedene Grundwassertypen leicht unterschieden werden.

Der Nachteil der PIPER-Diagramme besteht darin, dass sie keine Aussagen über die

effektive Höhe resp. die Konzentration der einzelnen Wasserinhaltsstoffe erlauben und sich deshalb in erster Linie für vergleichende Untersuchungen zwischen verschiedenen Wasserproben eignen.

Literarnachweis und -verzeichnis

- Bögli A. (1978): Karsthydrographie und physische Speläologie; Berlin.
- Hölting B. (1992): Hydrogeologie: Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie; 4. Auflage, Stuttgart (Ferdinand Enke Verlag).
- Michel G. (1997): Lehrbuch der Hydrogeologie Band 7, Mineral- und Thermalwässer; Berlin, Stuttgart (Gebrüder Borntraeger).
- Richter D. (1989): Ingenieur- und Hydrogeologie; Berlin, New York (Walter de Gruyter).

Bauwerksuntersuchungen

Bözbergtunnel der Nationalstrasse A3

Der Bözbergtunnel nimmt unter den Tunnelbauten im schweizerischen Jura-gebirge eine Sonderstellung ein. Er ist neben dem unmittelbar benachbarten Bözberg-Bahntunnel (1870/71) und dem Hauenstein-Basistunnel (1912–15) erst der dritte Tunnel, der

die Hauptaufschiebung des Faltenjuras auf den Tafeljura durchstochen hat.

Der Bözbergtunnel führt aus dem Tal der Sissle ins Aaretal. Das Fricktal ist gänzlich in die Schichtstufen-Landschaft des Tafeljuras eingeschnitten. Diese Schichten fallen leicht

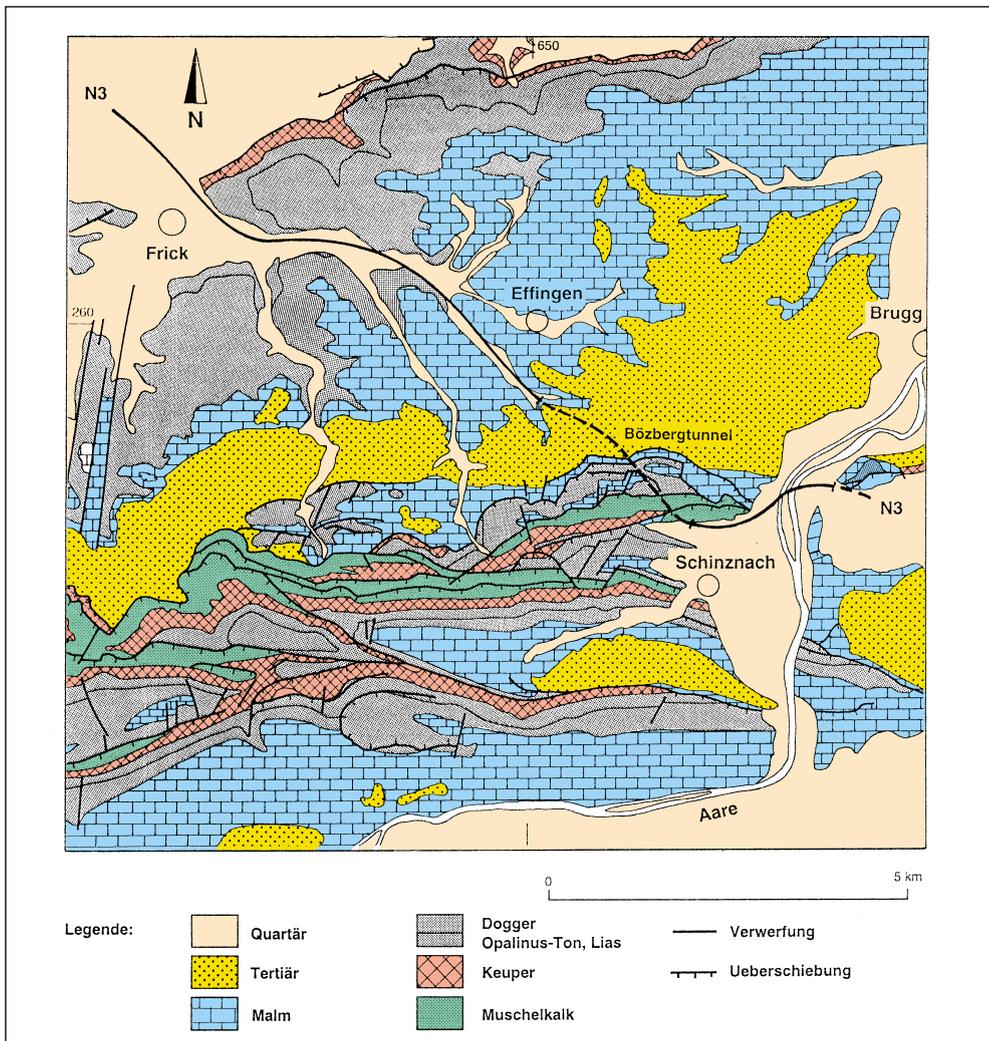


Abb. 1: Nationalstrasse N3: Geologische Übersichtskarte des Bözberggebietes (z.T. nach P. Diebold, Geologischer Atlas der Schweiz 1:25'000, Blatt Frick, hg. Landeshydrologie und -geologie, BUWAL, Bern, im Druck).

südwärts ein und bestehen im Norden am Rhein aus der Trias, sodass gegen Süden immer jüngere Gesteine auftauchen und am Ende, beim Oberlauf der Sissle, die Mergel und Kalke des Malms erreicht sind. Auf dem Plateau des Bözberges finden sich Ablagerungen des Tertiärs sowie Relikte der Eiszeiten. Der Faltenjura stellt die durch Schub von den Alpen her gestauchten und auf den Tafeljura geschobenen Sedimente der südlichen Umrandung des Schwarzwaldes dar. Als Abscherhorizont dienen dabei die salz- und sulfathaltigen Schichten der mittleren Trias. Hier sind entlang einer Linie Bözberg–Eptingen und westwärts von Süden her Gesteine auf die vorgelegte Tafel aufgeschoben worden, wobei nie ältere Gesteine als die des Mittleren Muschelkalkes in die Aufschiebung einbezogen sind.

Bergwasser während des Vortriebes der beiden Tunnelröhren

Weströhre (Vortrieb von Schinznach nach Effingen)

Während des Vortriebes der 3,7 km langen Weströhre wurden durch die örtliche Bauleitung in periodischen Abständen Bergwasserproben entnommen und chemisch auf den Gehalt an gelösten Wasserinhaltsstoffen analysiert.

Zu Beginn des Vortriebes ergaben die chemischen Analysen der gelösten Inhaltsstoffe niedrige bis mittlere Werte und bestätigten damit die geologische Prognose. Die erste starke Abweichung eines Messwertes wurde bei einer Bergwasserprobe (Entnahmedatum 3. November 1990), die der Tunnelbrust bei Tm 519 entnommen wurde, ermittelt. Es ergab sich bei dieser Probe ein Sulfatgehalt von 4330 mg/l. Eine zweite Bergwasserprobe aus der unmittelbaren Umgebung (Tm 524) bestätigte mit einem Sulfatgehalt von 4248 mg/l die Analyse der ersten Probe.

Geologisch befand man sich im Faltenjura in einer Zone aus Gips, grünen Tonen und dolomitischen Mergeln noch vor dem Opalinuston. Dieser Bereich liegt in der Schutzzone 1 (Massnahme zugunsten der Mineral-

quelle von Schinznach Bad) der Weströhre (bis Tm 535).

Im Laufe des weiteren Vortriebs der Weströhre wurden an weiteren Stellen sehr hohe Sulfatgehalte (> 4000 mg/l) in den Bergwasserproben ermittelt. Es zeigte sich zudem, dass stark mineralisiertes Bergwasser nicht nur im Süden (Bereich des Faltenjuras), sondern auch in der Zwischenzone (Opalinuston – Effingerschichten) und insbesondere im Tafeljura auftrat.

Die gemessenen Sulfatkonzentrationen von über 4000 mg/l lagen weit über der Löslichkeit von reinem Gipssulfat, was zu dem Schluss führte, dass weitere, bislang unbekannte Wasserinhaltsstoffe im Bergwasser enthalten sein mussten.

Dies war der Beginn einer rund zweijährigen Untersuchungsphase mit dem Ziel, die Hydrogeologie des Bözbergtunnels genauer abzuklären. Es standen dabei folgende Fragen im Vordergrund.

- Ist das Auftreten von stark mineralisiertem Tiefengrundwasser auf bestimmte Tunnelbereiche begrenzt und wie müssen diese definiert werden?
- Wie verändert sich die Menge und Zusammensetzung des Bergwassers im Laufe der Zeit?

Um diese Fragen zu beantworten, wurden die folgenden Untersuchungen durchgeführt:

- Analyse von bergwasserbedingten Ablagerungen auf der Innenseite der Stahlbetontübbinge (ca. 15 Proben)
- Entnahme von Wasserproben aus Feuchtstellen im Gewölbe (ca. 10 Proben).

Analyse der Ablagerungen

Ausgehend vom Südportal konnten auf den ersten 500 Metern ausschliesslich Kalkablagerungen identifiziert werden! Die Mächtigkeit variiert stark von Quelle zu Quelle, bleibt aber während des Beobachtungszeitraums konstant. Besonderes Merkmal der Kalkablagerungen: Sie sind praktisch wasserunlöslich



Abb. 2: N3 Bözbergtunnel Weströhre (Aufnahme 29.4.91). Tm 235. Analyse der Ausscheidungen durch das Institut Bachema, Protokoll-Nr. 2684. Resultat: Kalkausscheidungen, keine Spuren von Sulfat oder Chlorid.



Abb. 3: N3 Bözbergtunnel Weströhre (Aufnahme 29.4.91). Tm 1017. Resultat: Natriumsulfatausscheidungen mit wenig Chlorid. Der Sulfatgehalt im Bergwasser variiert von 3350 mg/l bis zu 28'000 mg/l, Chloridgehalt immer > 1290 mg/l. Summe der gelösten Stoffe min. 7,1 g/l, max. 65 g/l.



Abb. 4: N3 Bözbergtunnel Weströhre Extensometerkopf (Aufnahme 29.4.91). Tm 790. Resultat: Natriumsulfatausscheidungen mit wenig Kalk und 2% Chlorid. Bergwasser mit 4000 mg Sulfat, 3200 mg Chlorid und 3080 mg Natrium.



Abb. 5: N3 Bözbergtunnel Tm 1051. Analyse der Ausscheidungen durch das Institut Bachema, Protokoll-Nr. 2693, und Kantonales Laboratorium Aarau, Probe 10. Analyse Bergwasser durch das Institut Bachema, Protokoll-Nr. 2694, und Kantonales Laboratorium Aarau, Proben 09 + 11. Resultat: Natriumausscheidungen mit bis zu 8% Chlorid. Bergwasser mit teilweise extrem hohem Sulfatgehalt. Chloridgehalt immer > 2450 mg/l.

		Tm 390	Tm 460	Tm 490	Tm 790	Tm 1020	Tm 2040
el. Leitfähigkeit	[μ S/cm]	1088	969	2450	12000	60000	5500
Kalzium	[mg/l]	224	185	530	430	400	104
Magnesium	[mg/l]	34	36	83	220	107	1
Natrium	[mg/l]	4,0	7	14	3080	20600	2900
Kalium	[mg/l]	7,1	2,4	10,5	44	570	2300
Chlorid	[mg/l]	3,0	5,0	3,1	3200	15700	900
Nitrat	[mg/l]	2	2	2	< 20	n.n.	n.n.
Sulfat	[mg/l]	490	320	1600	4000	28000	500
Karbonathärte	°fH	20,4	27,8	8,5			
Gesamthärte	°fH	69,9	61,0	166,4	197,8	143,8	26,4
Säureverbrauch, sv 4,3		4,09	5,55	1,69			

Tab. 1: Resultate der Bergwasserproben während des Vortriebs der Weströhre.

und lösen sich bei Kontakt mit den Lippen nicht auf.

Im grösseren Tunnelbereich vom Opalinuston bis zum Portal Effingen treffen wir nun auf Natriumsulfat- und Natriumchloridausscheidungen! Dieser ganze nördliche Tunnelbereich steht im Einzugsgebiet des stark mineralisierten Tiefengrundwassers. Die Ausscheidungen sind sehr gut wasserlöslich und schmecken kühlend (Natriumsulfat) und salzig (Natriumchlorid). Eine Verwechslung mit Kalk kann mittels Geschmacksprobe ausgeschlossen werden.

Analyse der Wasserproben

Hier decken sich die Analysenresultate mit jenen der Ablagerungen. Bis zum Tunnelelement 500 können einzig gipshaltige Muschelkalkwässer identifiziert werden. Ab Tunnelelement 550 folgen bis zum Nordportal in Effingen nun noch Tiefengrundwässer mit mehr oder wenig hoher Mineralisation!

Aufgrund der bisherigen Untersuchungen konnten die folgenden Typen von Wässern identifiziert werden:

- a) Gipswässer
- b) Natriumchlorid und Natriumsulfatwasser (Proben Tm 490, Tm 790, Tm 1020 und Tm 2040)
- c) Auskristallisation von Glaubersalz (Proben Tm 1017, Tm 790, Tm 1051).

Die Proben a) Gipswässer (Tm 380 und Tm 460) gehören der Tunnelstrecke 392–485 m an, die direkt vor der Hauptaufschie-

bung liegt und Gesteine sowohl der Anhydritgruppe als auch des Gipskeupers enthielt. Die Mineralisation liegt unter 1 g/l und ist durch Gips (CaSO_4) geprägt. Die Chloridgehalte sind vernachlässigbar klein (< 5 mg/l). Diese Proben entsprachen somit den zu erwartenden Verhältnissen.

Die Proben Tm 490, Tm 1020 sowie Tm 2040 unterscheiden sich nun aber ganz erheblich von den bisherigen. Sie stammen aus dem Südrand des aufgeboenen Tafeljuras oder aus dem ungestörten Tafeljura. Die Proben weisen Mineralsalzgehalte von ca. 2 g/l, 5 g/l, 10 g/l und > 25 g/l auf. Gelöst sind vor allem Natriumchlorid und Natriumsulfat, wobei parallel dazu die Magnesium- und Kaliumgehalte deutlich erhöht sind. Derartige Verhältnisse waren bislang im Nordschweizer Jura nicht bekannt. Aus der Bohrung Weiach der Nagra ist eine Wasserprobe aus den oberen Malmkalken untersucht worden, welche 6,6 g/l gelöste Stoffe enthält. Ähnliche Wässer brachte auch die Bohrung Schafisheim zu Tage (8,7 g/l).

Für den im Bau befindlichen Strassentunnel stellten sich nun die Fragen:

- Woher stammen die hohen Mineralgehalte?
- Kommt Pyrit als Sulfatlieferant in Frage?
- Handelt es sich um fossiles oder um junges infiltrierendes Wasser?
- Wie weit können Isotopenanalysen zur Beantwortung beitragen?

Zur Beantwortung der obigen Fragen wurden der Nagra in Wettingen (Hr. Dr. A.

Gautschi) verschiedene Wasserproben zur Analyse übergeben. An diesen Proben wurden hydrochemische Untersuchungen und Isotopenbestimmungen durchgeführt. In seinem Bericht kommt Dr. A. Gautschi zum Schluss, dass es sich bei den Proben um relativ hochmineralisierte Na- (Ca, Mg)- Cl- SO₄ (Tm 790) bzw. Na- (Ca, Mg)- SO₄- Cl (Tm 2231) Wässer mit Sulfatgehalten über 4000 mg/l handelt. Die stark mineralisierten chlorid- und sulfathaltigen Tiefengrundwässer sind nicht unter heutigen klimatischen Bedingungen infiltriert. Zur Interpretation wurden verschiedene Ionenverhältnisse (z.B. Br/Cl, F/Cl, Sr/F, Na/Cl usw.) herangezogen. Es zeigt sich, dass diese Wässer sehr ähnlich sind wie die sedimentären Na-Cl-Tiefengrundwässer der Nordschweiz. Diese Na-Cl-Wässer finden sich noch heute in Tiefen, die z.T. weniger als 200 m betragen. Die unterirdische Verweilzeit dieser Wässer ist beträchtlich (> 1000 Jahre, sehr wahrscheinlich vor- eiszeitlich).

Es ist möglich, dass sich die Wässer bei freiem Auslauf in den Tunnel mit der Zeit chemisch verändern (z.B. Beimischung von schwächer mineralisierten, jüngeren Wässern).

Der nächste Schritt diente dazu, das Problem und dessen Lösungsmöglichkeiten einzugrenzen:

- Bohrungen aus der im Bau befindlichen Weströhre. An ca. 7 Standorten wurde versucht, das Bergwasser «anzubohren». Damit sollte die Wirksamkeit allfälliger Drainage-

massnahmen wie beispielweise dem Bau eines tiefer liegenden Drainagestollens beurteilt werden. Das Resultat war negativ, nur eine der 14 Bohrungen stiess auf sehr wenig Bergwasser.

- Einteilung der West- und Oströhre in Tunnelbereiche entsprechend dem Aggressivitätsgrad des darin befindlichen Bergwassers.

- Zur Beurteilung der Entwicklung der Gesamtmineralisation des Bergwassers wurden Messreihen (Messungen der el. Leitfähigkeit der Wasserproben) aus den Kontrollschächten der provisorischen Entwässerungsleitung durchgeführt. Bis zum Februar 2000 wurden insgesamt 7 unabhängige Messreihen durchgeführt, deren Resultate in den wichtigsten Punkten miteinander übereinstimmen. Die Resultate können der nachfolgenden Planseite entnommen werden. Alle Messreihen starteten beim Nordportal in Effingen und endeten bei der Schutzzone (Tm 450) beim Beginn des Faltenjuras.

In den vergangenen 10 Jahren hat sich der Charakter der Messreihen nur unwesentlich verändert. Einzig im Bereich Tm 1100 – Tm 700 zeigt sich bei der neusten Messreihe vom Februar 2000 ein Einbruch der Messwerte der el. Leitfähigkeiten zu den vorangegangenen Untersuchungsergebnissen. Der Grund für diesen Einbruch liegt darin, dass im Bereich Tm 1100 – Tm 700 junges, schwach mineralisiertes Niederschlagswasser durch die Überdeckung bis auf Tunnelniveau vordringen konnte und sich dort mit dem Tiefengrundwasser vermischt hat. Dabei hat sich

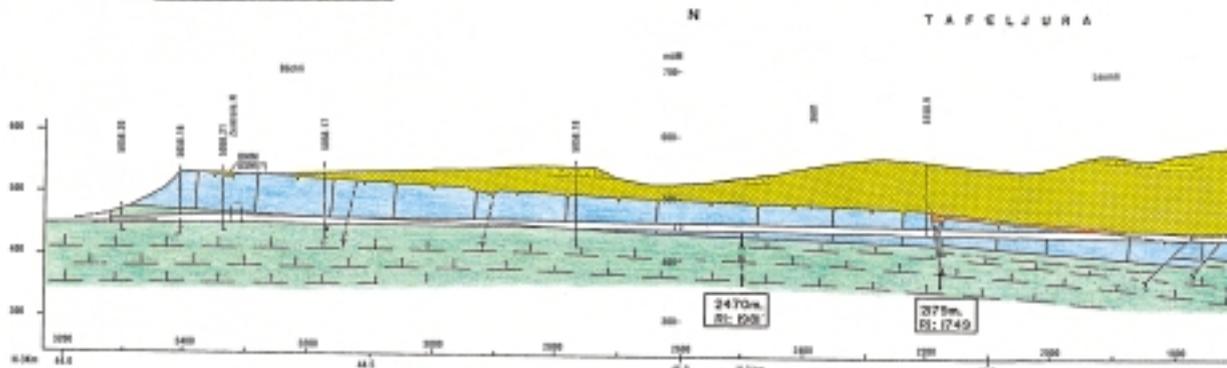
Tunnelbereiche der Weströhre	Tm	Mineralisation	Aggressivität 0, 1, 2, 3
I A	0– 480	Muschelkalkwasser ohne besondere Bedeutung Mineralisation ~1–2 g/l	1
I B	480– 550	Tiefengrundwasser ~7 g/l	2
II	550– 700	Trocken	0
III	700–1100	Tiefengrundwasser ~12 g/l	3
IV	1100–1800	Trocken	0
V	1800–2700	Tiefengrundwasser ~4 g/l	2
VI	2700–3000	Trocken	0
VII	3000–3400	Tiefengrundwasser ~6 g/l	2
VIII	3400–Nordportal	Niederschlagswasser	0

Tab. 2: Aggressivitätsgrade: 0 = nicht aggressiv, 1 = mittel, 2 = stark aggressiv, 3 = sehr stark aggressiv.

N3/06 Bözberg ①

Geologisches Profil Weströhre
 Linie 608 -
 vorläufige Interpretation

Prof. Sedlmayr | Dr. P. Strohli
 Geologisches Institut der Universität Basel
 Str. Präfektur Geologie 40504
 Steinstr. 16, 4058 Basel 25.3.2019, 13:30



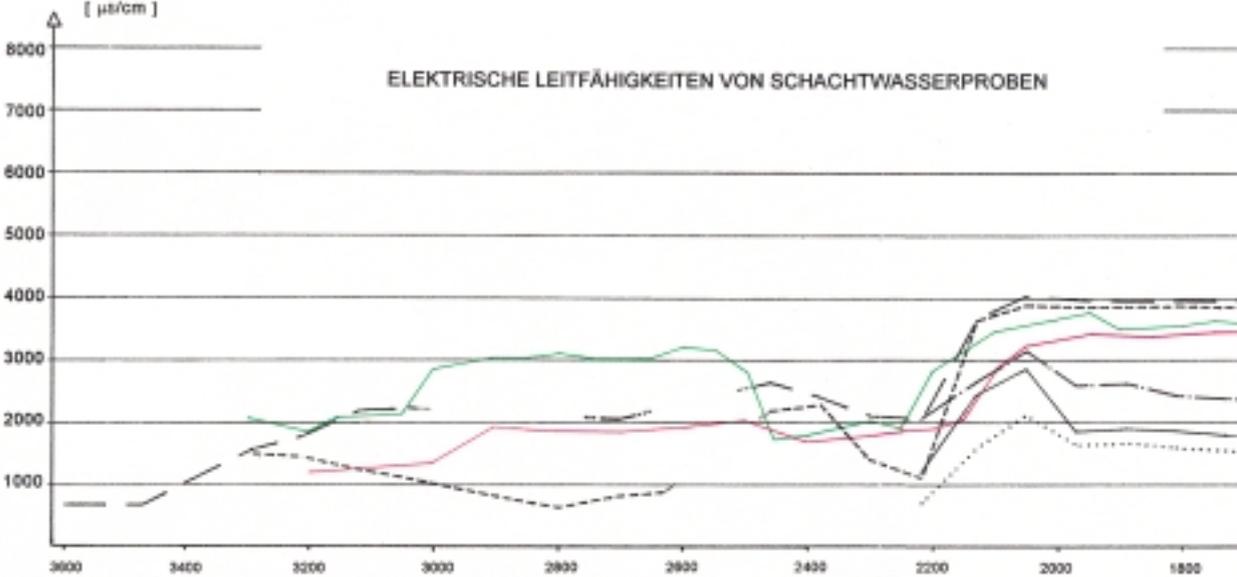
LEGENDE

- Gehängeschutt
Aufschüttung
- Überschiebung
- Abschiebung
- Sondierbohrung
1550m, R: 1243

- ### TERTIÄR
- Obere Süßwasser-Molasse
(Juraneffluvia)
 - Obere Meeres-Molasse
 - Untere Süßwasser-Molasse
 - Eozän (Bohnerzformation)

elektr. Leitfähigkeit
 [$\mu\text{S}/\text{cm}$]

ELEKTRISCHE LEITFÄHIGKEITEN VON SCHACHTWASSERPROBEN



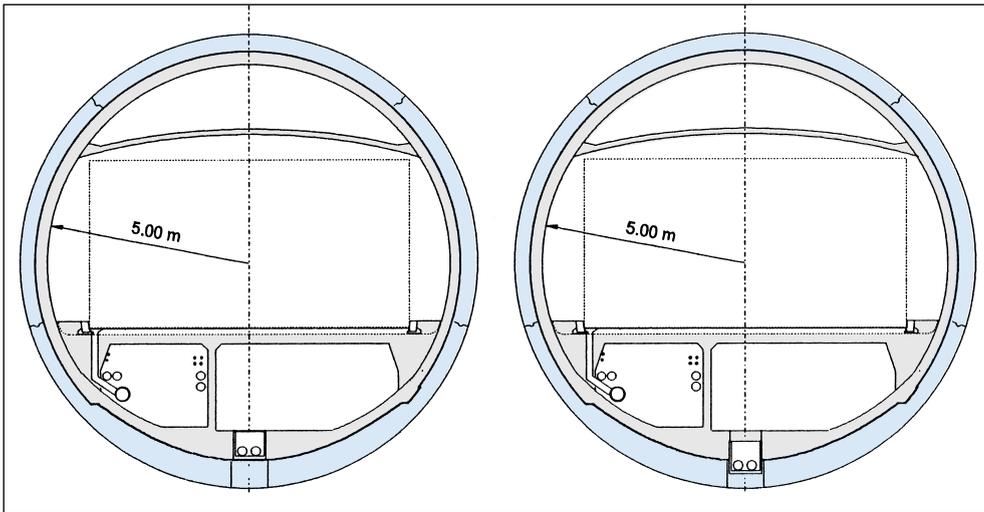


Abb. 6: Die Weströhre nach dem Umbau: links Profil in der Schutzzone der Therme von Schinznach (Vollabdichtung, ohne Drainage) und rechts Profil im übrigen Bereich. Zum Umbau mussten die Tübbingnocken (vgl. Abb. 7) auf mehreren Kilometern Länge entfernt werden, zudem wurde der Innenring stärker ausgebildet (40 cm, zuvor 30 cm).

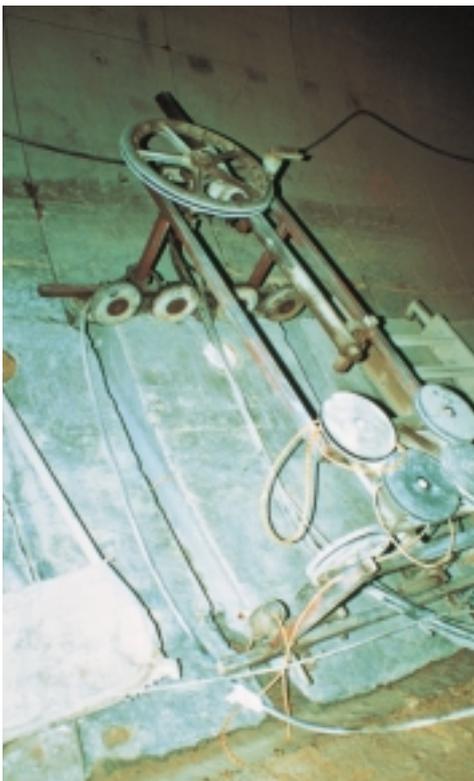


Abb. 7: Umbau der Weströhre
Abschneiden der Tübbingnocken (Auflager für die TBM) im Diamantschneideverfahren, damit der zusätzliche Innenring «Platz» hat.

die Wassermenge verdoppelt/verdreifacht, die Salzfracht dagegen ist konstant geblieben. Die Zuflüsse von stark mineralisiertem Tiefengrundwasser haben sich in den vergangenen 10 Jahren weder qualitativ noch quantitativ verändert.

In der Folge erarbeiteten die Projektbeteiligten verschiedene neue Tunnelkonzepte, die einen ausreichenden Schutz gegen die aggressive Wirkung dieser Wässer gewährleisten sollten. Die wichtigsten Varianten dieser Betrachtungen waren:

- Oberflächenschutz der Tübinge
- Erhöhung der Armierungsüberdeckung durch Ausinjizieren der Ringspaltverfüllung
- Ringspalthinterfüllung mit speziellem Mörtel anstelle von Feinkies
- Kathodischer Korrosionsschutz
- Verwendung von kunststoffbeschichteter Armierung
- Erhöhung der Betonqualität
- Umbau des Normalprofils der Weströhre; Vollabdichtung; tragender Innenring inkl. Sohlgewölbe
- Projektänderung in der Oströhre; dünner Tübbingring; Vollabdichtung; tragender Innenring.

Parallel dazu wurden umfangreiche Laborversuche durchgeführt und Betonproben dem bereits eingebauten Tübbingring in der Weströhre entnommen und analysiert. An mehrtägigen Sitzungen, unter der Beteiligung von Materialtechnologen aus dem In- und Ausland, wurde die Situation erläutert, analysiert und mögliche Schadensentwicklungen an der Rohbaustruktur der beiden Tunnelröhren skizziert. Im Herbst 1991 fiel der Entscheid zum Umbau der Weströhre und zu umfangreichen Projektänderungen in der Oströhre.

Ein Tübbingüberwachungssystem, das in der Weströhre installiert wurde, soll die Möglichkeit bieten, in den kommenden Jahren den Zustand des Tübbingausserings qualitativ und quantitativ zu erfassen.

Die Projektanpassungen in beiden Tunnelröhren werden die Korrosionsgeschwindigkeit an der Rohbaustruktur (Beton und Armierung) sehr stark hemmen, sodass in den kommenden Jahrzehnten mit keinen nennenswerten Schäden zu rechnen ist.

Einflüsse des Tiefengrundwassers auf die Rohbaustruktur

Betonkorrosion

Das natriumhaltige Tiefengrundwasser des Bözbergtunnels greift den Beton vor allem durch die Einwirkung der wasserlöslichen Sulfate an. Sulfathaltige Lösungen haben ein hohes Benetzungsvermögen und dringen daher relativ schnell und tief in den Beton ein. Enthält der Beton vom Zement her Trikalziumaluminat (C_3A), so können die Sulfationen mit dessen Hydratationsprodukten reagieren. Dabei bildet sich primär Trikalziumaluminattrisulfathydrat, das kurz Trisulfat oder, wie das entsprechende natürliche Mineral, Ettringit genannt wird. Die nadelförmigen Ettringitkristalle wachsen in den Betonporen und können, wenn nicht mehr genug Platz für ein freies Wachstum vorhanden ist, durch einen Druckaufbau zum Zertreiben des Betons führen. Bei hohen Sulfatkonzentrationen (etwa ab 1200 mg/l) kann sich aus

der in den Zementsteinporen enthaltenen Kalziumhydroxidlösung Gips ausscheiden, der ebenfalls treibend wirkt. Bei diesem Angriff ist der C_3A -Gehalt des Zementes bedeutungslos. Sulfatschäden sind dort besonders schlimm, wo sich durch die wechselnde Austrocknung und Durchfeuchtung die Salze anreichern und eine verstärkte Treibwirkung entfalten können.

Eine weitere Gefahr, die durch den hohen Natriumgehalt des Bergwassers verursacht wird, verbirgt sich bei jenen Stellen, wo durch einen jahrzehntelangen, stets gleichgerichteten Feuchtigkeitsstrom, verbunden mit der anschließenden Verdunstung des Wassers, die Salze im Beton angereichert werden. Die Anreicherung der Salze führt nach Überschreitung bestimmter Konzentrationsgrenzen zur Zerstörung des Betongefüges (infolge Kristallisationsdruck). Nach Angaben des Labor-Prüfinstituts Beinwil am See gelten zurzeit folgende Richtwerte.

- Zerstörung durch NaCl bei 5–6 Massen-% Cl-Ionen, bezogen auf den Gehalt an Bindemittel (Zement).
- Zerstörung durch Na_2SO_4 bei 3,5–4 Massen-% SO_4 -Ionen, bezogen auf den Gehalt an Bindemittel (Zement).
- Zerstörung durch Na_2CO_3 bei 4–5 Massen-% CO_3 -Ionen, bezogen auf den Gehalt an Bindemittel (Zement).

Durch die Projektänderungen in den beiden Tunnelröhren wird der gefährlichste Korrosionsmechanismus (Verdunstung des Wassers und Anreicherung der Salze) verhindert und dadurch der Angriff durch das aggressive Bergwasser sehr stark abgeschwächt. Zudem ist der tragende Innenring durch die Abdichtung vollständig vor dem Bergwasser geschützt.

Korrosion der Bewehrung

Der Zeitpunkt des Beginns der Korrosion auf Armierungsstahl wie auch der zeitliche Verlauf des Korrosionsvorganges selbst sind sehr stark von der Wanderung der korrosionsfördernden Stoffe im Beton abhängig. Die Poro-

sität und der Wassergehalt des Betons erweisen sich dabei als entscheidende Faktoren. Da der pH-Wert im Beton hoch ist, kommt als kathodische Teilreaktion nur die Sauerstoffreaktion in Frage. Aus diesem Grund ist die Diffusion des Sauerstoffs durch den Beton zur Bewehrung ebenfalls ein geschwindigkeitsbestimmender Faktor. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Korrosion der Bewehrung im Normalfall nur durch ein Zusammenspiel von Feuchtigkeit im Beton, Sauerstoffgehalt und einem «Katalysator» (Chloridgehalt, Karbonatisierung) ausgelöst wird.

Die wichtigsten Parameter bei der Korrosion von Stahl im Beton sind:

- W/Z-Faktor
- Dicke der Betonüberdeckung
- pH-Wert des Betons auf Höhe der Bewehrung
- Chloridkonzentration im Beton auf Höhe der Bewehrung
- Wassergehalt im Beton
- Sauerstoffgehalt im Beton
- Potential an der Phasengrenze Stahl/Beton
- Leitfähigkeit
- Zusammensetzung und Gefüge des Stahls.

Durch das Tiefengrundwasser dringen die Chloride durch den Beton bis zur Armierung vor und zerstören dort, auch bei einem hohen pH-Wert des Betons, den Passivfilm. Da die Korrosionsgeschwindigkeit der Bewehrung nicht allein von der Chloridionenkonzentration des Betons abhängt, sondern, wie bereits erwähnt, auch von anderen Grössen wie dem W/Z-Faktor, der Feuchtigkeit des Betons oder auch der Menge und der Zusammensetzung des verwendeten Zementes beeinflusst wird, erstaunt es nicht, dass weltweit kein einheitlicher Grenzwert für den Cl-Gehalt des Betons vorgeschrieben wird.

Die zulässigen Chloridkonzentrationen variieren im Allgemeinen zwischen 0,15–0,6% Chlorid bezogen auf das Zementgewicht. Es kann aber festgehalten werden, dass in der Praxis intakte Armierungsstähle in der Mehrzahl der Fälle bis zu Chloridkonzentra-

tionen von weniger als 0,4% zu finden sind, während starke Korrosionsangriffe gehäuft erst bei Cl-Konzentrationen von über 1% beobachtet werden.

Neben den Chloridgrenzwerten ist noch die Eindringgeschwindigkeit der Chloridionen in den Beton für das Korrosionsverhalten von grosser Bedeutung. Abgesehen von der Fähigkeit des Betons, einen Teil der Chloridionen zu binden, hängt die Eindringgeschwindigkeit der Chloridionen im Wesentlichen von der Art des Transportmechanismus durch das Porensystem ab. Die massgebende Treibkraft für den Transport von Schadstoffen ist die Kapillarwirkung in den Poren.

Einen weiteren wichtigen Parameter für die Bewehrungskorrosion spielt der pH-Wert. Ein hoher pH-Wert, der durch den alkalischen Charakter des Porenwassers verursacht wird, kann durch die Einwirkung von CO₂ aus der Atmosphäre oder aus dem Bergwasser selbst (**Vorsicht vor sauren Wässern!**), zerstört werden. Die Karbonatisierung des Betons hängt sehr stark von den Feuchtigkeitsverhältnissen im Beton ab (die Diffusionsgeschwindigkeit von CO₂ in Wasser ist etwa 10'000 mal langsamer als in Luft). Für die Karbonatisierungsreaktion ist Wasser erforderlich. So ergibt sich, dass bei ganz trockenen oder ständig durchfeuchteten Bauteilen die geringsten Karbonatisierungsgeschwindigkeiten registriert werden.

Das Zusammenwirken der verschiedenen Korrosionsparameter bestimmt schliesslich den Angriffsgrad und die Korrosionsgeschwindigkeit auf die Bewehrung. Ausgeprägte Korrosion an der Bewehrung tritt immer dann auf, wenn Wasser, Sauerstoff und Chloride, bzw. die Karbonatisierungsfront, rasch bis an die Stahloberfläche vordringen können. Die Wanderung von O₂ und CO₂ erfolgt bei hohen Wassergehalten langsam, in ausgetrocknetem Zustand jedoch sehr rasch. Die Chloride dagegen dringen zusammen mit dem Wasser in den Beton ein. Die Karbonatisierung erfolgt bei Luftfeuchtigkeiten zwischen 40–60% am schnellsten, im Gegensatz zum Korrosionsvorgang, der erst bei höheren Feuchtigkeiten merklich in Gang

kommt. Die Korrosionsgefahr ist aus diesen Gründen bei konstanten Bewitterungs- bzw. Lagerungsverhältnissen klein, steigt jedoch merklich an, wenn die Bauteile der sog. Wechsellagerung ausgesetzt sind. Die Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass aus diesem Grund die Korrosionsgefahr im Bereich von Wasserwechselzonen oder etwa im Spritzwasserbereich wesentlich grösser ist. Massnahmen, die den Wassergehalt des Betons stabilisieren, erniedrigen deshalb die Korrosionsgefahr.

Die Projektänderungen zum Schutze der beiden Tunnelröhren können eindeutig als Massnahmen bezeichnet werden, die den Wassergehalt der gesamten Rohbaukonstruktion stabilisieren. Zudem verhindert die vollflächige Abdichtung das rasche Eindringen von O₂- und CO₂-Gas in den Tübbingaussering und schützt gleichzeitig den Innenring vor dem Eindringen der im Bergwasser gelösten Chloridionen. Der kapillare Wassertransport durch den Tübbingaussering wird stark reduziert, weil die Möglichkeit der Wasserverdunstung sehr stark behindert wird. Dadurch wird auch die Eindringgeschwindigkeit der Chloridionen in den Aussenring stark verlangsamt.

Die Stahlkorrosion im Tübbingaussering wird deshalb stark verlangsamt verlaufen und in den kommenden Jahrzehnten kaum grössere Ausmasse annehmen.

Das Quellverhalten der Tonmineralien

Das Quellverhalten der Tone hängt unter anderem von der Ionen-Form der Tonmineralien ab. Tonmineralien haben negativ geladene Flächen, welche durch positive Ionen (Natrium, Kalium, Kalzium, Magnesium...) ausgeglichen werden. Diese positiven Ionen sind austauschbar und bilden mit der negativen Tonoberfläche eine Doppelschicht. Die Dicke der Doppelschicht und damit die abstossende Kraft, welche zur Quellung führt, ändert sich mit der Wertigkeit und dem Radius der Gegenionen. Durch den Austausch der Kalzium-Gegenionen (Ca-Form) mit Natriumionen (Na-Form) wird die Doppel-

schicht dicker und das Quellpotential nimmt zu. Dieser Ionenaustausch erfolgt in der Richtung der höheren Wertigkeit der Ionen, kann aber bei genügend grossem Ionenangebot auch gegenläufig sein, d.h., um Kalzium vollständig durch Natrium zu ersetzen, braucht es einen 5–10-fachen Überschuss an Na-Ionen.

Quelldrücke von Tonen in Na-Form sind ca. viermal grösser, und die Scherfestigkeit ist aufgrund experimenteller Untersuchungen ca. dreimal kleiner als von Tonen in Ca-Form.

Wegen des aufsteigenden natriumhaltigen Tiefengrundwassers und der durch den Vortrieb verursachten Auflockerung des Gesteinsverbandes wurde abgeklärt, ob die potentielle Gefahr einer Umwandlung des Tonen in Na-Form besteht oder nicht.

Deshalb wurde an ausgewählten Opalinus- und Effingtonproben die Ionenform der Tonmineralien bestimmt. Diese Untersuchungen ergaben, dass die Tone zum überwiegenden Teil bereits in Na-Form vorliegen und offensichtlich ein Unterschied zwischen den Tonen aus undeformierten und deformierten Bereichen (Tafeljura–Faltenjura) vorliegt. Diese Tatsache könnte auf eine teilweise Umwandlung der Tone infolge der Jurafaltung hinweisen. Die Umwandlung der Tone von zweiwertiger in einwertige Ionenform wird mit dem spröden Verhalten des Tongesteins unter den Bedingungen der Jurafaltung im Bereich der Überschiebungszonen erklärt. Dabei wurde die Wegsamkeit für aufsteigende mineralisierte Wässer an den Überschiebungsbahnen begünstigt. Durch tektonische Hebung und Erosion seit Beginn der Aufschiebung fand eine zusätzliche Wasseraufnahme der Tone statt, welche den Ionenaustausch erleichtert. Dass die Tone in Na-Form vorliegen, bedeutet für den Tunnelbau allgemein keine Verschlechterung der geotechnischen Eigenschaften. Im Gegenteil, durch den Kontakt der Tone in Na-Form mit Na-haltigen Wässern sind geringere Quellungen zu erwarten.

Literaturnachweis und -verzeichnis

Einflüsse des Bergwassers auf die verschiedenen Bauwerksteile des N3 Bözbergtunnel, Schlussbericht, Ingenieurbüro Wegmüller Riehen 1991–1993 (inkl. Zwischenberichte)

Ergebnisse der Isotopengehaltsbestimmungen von Sickerwasser im Bereich des Bözbergtunnels, Hydroisotop GmbH, Attenkirchen 12.5.1992

San Bernardino-Strassentunnel der Nationalstrasse A13

Der San Bernardino-Tunnel bildet das Kernstück der Nationalstrasse N13 St. Margrethen–Castione. Diese rund 206 Kilometer lange Alpentransversale stellt die kürzeste Verbindung zwischen dem östlichen Bodenseeraum und dem lombardischen Seebecken dar. Die Verbindung folgt den alten Handelswegen, dem Flusslauf des Rheins im Norden und demjenigen der Moesa im Süden. Dabei liegt das Gebiet des Hinterrheins und das Misox im Bereich der penninischen Gebirgsformationen. Bei Aundeer treten mit den Gneisen der Sucetta die nördlichen Deckenstirnen der oberen penninischen Decken in Erscheinung, während an der westlichen Talflanke bis hinauf nach Splügen heterogene Gesteinsmassen (Kalk, Dolomite, Marmore, Rauhwacken, Tonschiefer) in bunter Folge einander ablösen. Westlich der Misoxermulde schiebt sich die Aduladecke bis in die

Gegend von Vals nach Norden, östlich breitet sich zwischen der Valle San Giacomo und der Talachse der Mesolcina die Tambodecke aus. Beide bestehen zur Hauptsache aus mächtigen kristallinen Schieferkernen (Gneise und Glimmerschiefer).

Geologie

Die Tunnelachse des San Bernardino-Tunnels liegt auf der Adula-Decke; sie bildet im Gebiet des San Bernardino-Passes ein flaches Gewölbe, das mit grosser Gleichmässigkeit nach Osten einfällt, so dass die Schichten nahezu parallel zur Tunnelachse streichen. Die vorhandenen Gesteine sind zur Hauptsache Ortho- und Paragneise mit relativ hohem Glimmergehalt. Der Wechsel der verschiedenen Gesteinsarten erfolgt

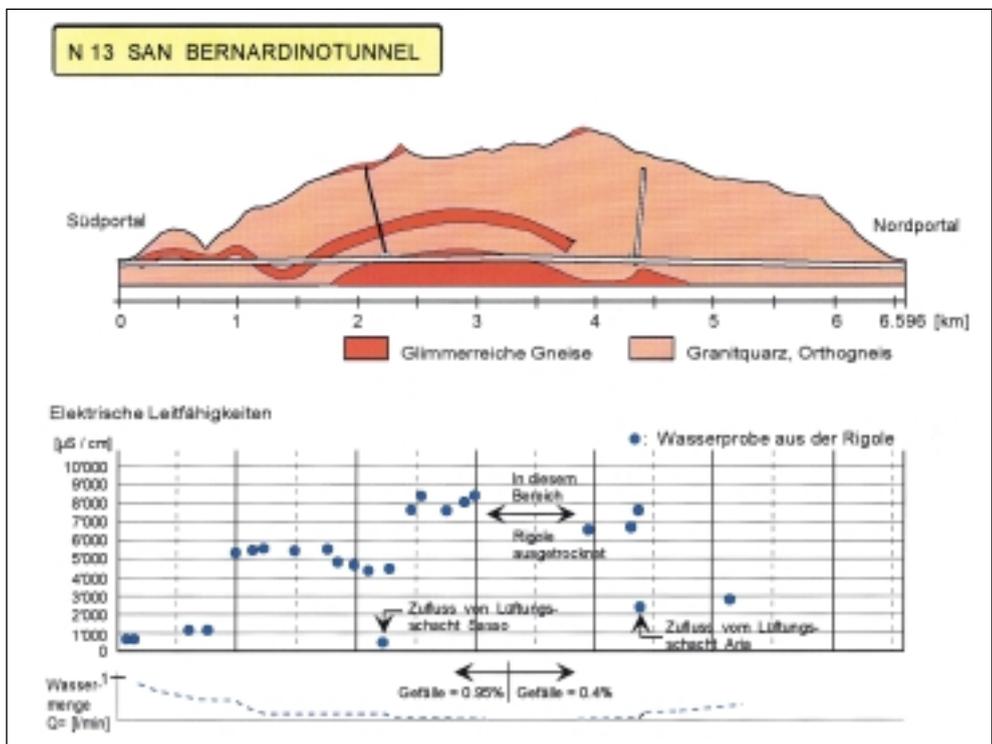


Abb. 1: Längsprofil des Strassentunnels mit Messwerten der el. Leitfähigkeiten von Wasserproben aus der Rigole.

**Untersuchungsergebnisse Wasserproben N13
San Bernardino-Tunnel, Leitungskanal Ost, Element
1773 (km 4,385 ab Südportal)**

el. Leitfähigkeit	µS/cm	7440
pH-Wert (Labor)	pH	8,01
pH-Messtemperatur	°C	22,4
Kalzium (gelöst)	mg/l	381
Magnesium (gelöst)	mg/l	219
Natrium (gelöst)	mg/l	1560
Kalium (gelöst)	mg/l	108
Strontium (gelöst)	mg/l	7,7
Chlorid	mg/l	399
Nitrat	mg/l	15
Sulfat	mg/l	4590
Fluorid	mg/l	1,4
Silikate als SiO ₂	mg/l	12,1

Tab. 2: Analysenergebnisse einer Wasserprobe aus der Rigole, Leitungskanal Ost, km 4,385 ab Südportal.

Es ist nicht möglich, anhand einer Wasserprobe aus der Rigole im Tunnelinnern den CO₂-Gehalt zu bestimmen, den das unbeeinflusste Bergwasser beim Zuströmen auf das Bauwerk aufweist, denn

- während des Zuströmens des Bergwassers Richtung Tunnel entspannt sich das Bergwasser, wodurch das gelöste CO₂ Gasblasen bildet und entweicht.

- Das immer noch gelöste CO₂ des Bergwassers reagiert mit den basischen Zementbestandteilen und wird dabei neutralisiert.

- Das verbleibende CO₂ im Rigolenwasser kann durch die grosse Kontaktfläche Bergwasser ↔ Luft entweichen.

- Durch die Wasserprobeentnahme, den Transport ins Labor usw. entweicht mit grosser Sicherheit ein weiterer grosser Anteil des CO₂.

- Je nach Bauwerk werden auf diese Weise aus negativen pH-Werten zwischen 4 und 5 pH-Werte zwischen 7 und 8 im Labor in Zürich.

Messwerte von CO₂-Gehalten von Wasserproben sind grundsätzlich als stark beeinflusst zu betrachten.

Die Resultate der übrigen Wasserinhaltsstoffe sind demgegenüber recht unempfindlich, was die Beeinflussung durch Druckentlastung betrifft. Der Zementeinfluss muss aber auf jeden Fall immer berücksichtigt werden. pH-Wert-Messungen sind nach Möglichkeit immer vor Ort durchzuführen. Die nebenstehende Wasseranalyse zeigt einen deutlich anderen Charakter als die Quelle von San Bernardino. Während wir bei San Bernardino eine Gipsquelle antreffen, stossen wir im Tunnelinnern auf stark mineralisiertes natriumreiches Tiefengrundwasser. Die in beiden Quellen gleich hohen Strontium- und Silikatgehalte zeigen, dass eine partielle Aufkonzentration des Tunnelwassers unwahrscheinlich ist. Auch für den Fall, dass die ca. 400 mg Chloride durch den Streusalzeinsatz ins Wasser gelangt sind, verbleibt ein Natriumüberschuss von (Massenverhältnis Na : Cl = 22 : 35) 1300 mg. Es zeigt sich einmal mehr, dass auch bei unmittelbarer Nachbarschaft einer Mineralquelle die effektiv auftretenden Bergwasserzuflüsse im Tunnel 10-fach stärker mineralisiert sein können. Dies bestätigt der im Bau befindliche Gotschnatunnel auf eindruckliche Weise. Während die benachbarte Mineralquelle des Bades von Serneus mit rund 1 g/l Mineralsalze zu Buche steht, stossen wir im Tunnelinnern auf weiten Strecken auf Bergwasser, die 5–10 g gelöste Stoffe und zudem aggressive Gase enthalten. Entgegen der bisherigen Erfahrung mit stark mineralisierten Wässern sind dabei die angetroffenen Wassermengen nicht etwa klein (Liter/min), sondern liefern zusammen mehrere 10 l/s.

Die Analyse der Bergwasserprobe kann stellvertretend für den ganzen San Bernardino-Tunnel stehen, denn sowohl die geologischen wie auch die hydrologischen Verhältnisse bleiben nahezu konstant. Auffallend war zudem die äusserst geringe Wasserführung im ganzen Bauwerk. Neben den Bergwasserhältnissen wurde auch der bauliche Zustand des Tunnels so weit als möglich



Abb. 3a/b: Zerstörung des Widerlagerbereichs durch Bergwasser, das unter Druck durch die Tunnelschale dringt. Die Zersetzungsprodukte weisen hohe Gehalte an Gips, Ettringit und Thaumazit auf.

untersucht. An vielen Stellen wurden neben den bekannten Schäden an der Fahrbahnplatte auch massive Betonschäden an der Auskleidung im Widerlagerbereich festgestellt. Diese Schäden betreffen in der Regel die Tunnelschale in beiden Leitungskanälen. Da die Beton- und Armierungsschäden an

der Fahrbahnplatte bereits eingehend untersucht wurden, konzentrierten wir uns auf jene an der Tunnelschale.

Durch das Fehlen eines flächenhaften Entwässerungssystems zwischen dem Bauwerk und dem Fels ist der zur Verfügung stehende Versinterungshohlraum extrem

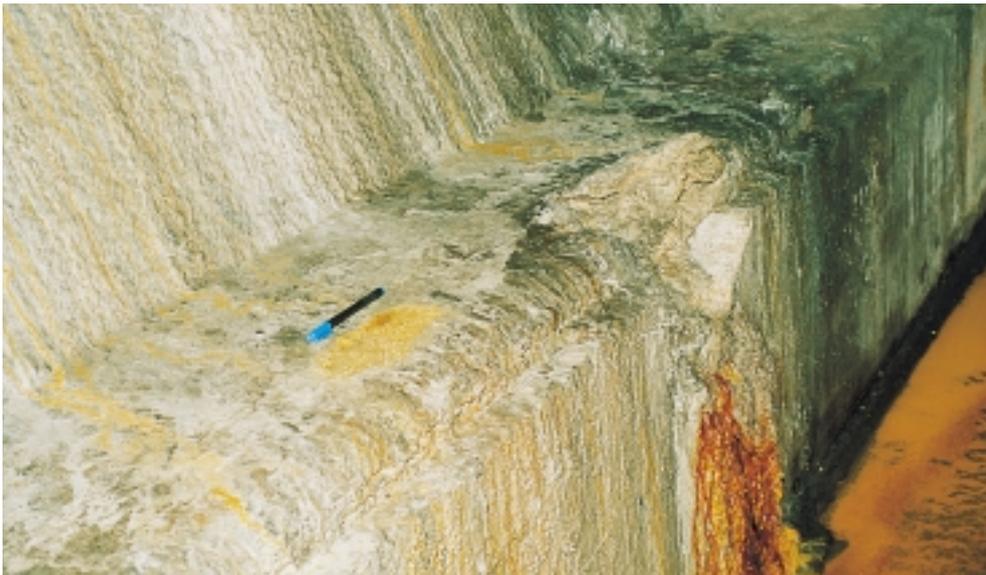


Abb. 4: Zerstörung des Betons durch Gipsstreifen.



Abb. 5: In den Verdunstungszonen können sich die Wasserinhaltsstoffe anreichern, denen kein Beton «gewachsen» ist. Zudem genügt oft die Sprengwirkung der Salzkristalle, um Schäden zu verursachen.

klein ausgefallen. Das anfallende Bergwasser zeigt aber stark ablagernde Eigenschaften und verstopft den verbleibenden Hohlraum

in Kürze. Die Folge ist, dass das Bergwasser ansteigt und sich neue Wege durch die Schwachstellen (Fugen, Niesnester) im Bau-

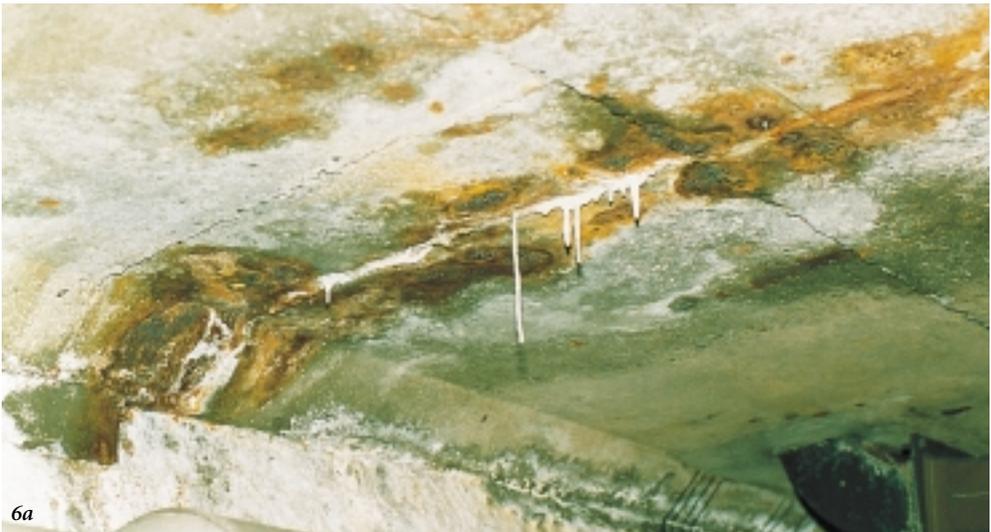


Abb. 6a/b: Die Kombination von stark mineralisiertem Bergwasser (ca. 7 g/l Mineralsalze) mit sehr viel Kohlendioxid, das sich aus der Tiefe beimischt, und einer ungünstigen Bergwasserableitung (kein druckloses Ableiten des Bergwassers, sondern Aufstau) hat zu den massiven Schäden geführt. Streusalze und stellenweise ungenügende Betonqualität beschleunigten dabei den Korrosionsprozess.



werk sucht, wo es unter hohem Druck durchgepresst wird und Korrosionsschäden verursacht. Die Korrosionsschäden im San Bernardino-Tunnel sind eine direkte Folge eines defekten Entwässerungssystems. Dabei ist es unerheblich, wie gross die anfallenden Bergwassermengen sind.



Abb. 7: Tiefgreifende Zerstörung des Betons durch Gipstreiben (Widerlagerbereich).

Befund einer Betonrückstandsprobe durch das Institut Bachema AG

«Aus der Tunnelschale wurde im Widerlager-Paramentbereich des östlichen Leitungskanals ein Betonbruchstück entnommen und dem Institut Bachema zur Analyse übergeben. Die Rückstandsprobe wurde einem TVA Eluattest 2 unterzogen. Die Resultate zeigen, dass es sich um einen stark sulfathaltigen Rückstand handelt. Auffallend ist weiter der relativ wenig basische pH-Wert des Beton-Eluats. Die Ergebnisse legen nahe, dass der Betonrückstand durch säurehaltiges (CO_2) und gipshaltiges Wasser zerstört wurde.»

Literarnachweis und -verzeichnis

Untersuchungsbericht chemische Untersuchung von Bergwasser, Kristallinat, Betonrückstand San Bernardinotunnel Nr. 96002080, Institut Bachema AG, Zürich 16.9.1996

Quartertunnel der Nationalstrasse A3

Der Quartertunnel ist ein wichtiges Verbindungsstück der Nationalstrasse A3, die entlang dem Walensee das obere Zürichseegebiet mit dem Churer Rheintal verbindet. Der Tunnel wurde erst Ende der 80er Jahre in Betrieb genommen und befindet sich in einem tadellosen Zustand.

Das im Tunnel anfallende Bergwasser ist eher schwach mineralisiert, neigt aber wie fast alle Bergwässer in der Region zu sehr starken Versinterungen. Das Bergwasser wird drucklos gefasst und im Werkleitungsstollen, unterhalb des Fahrtraums, in offenen Rigolen zu den Portalen geführt und dort via Vorfluter in den Walensee geleitet.

Über diesen Bergwasserrigolen befindet sich eine HD-PE-Transportleitung, die über Schrauben mit den vorfabrizierten Stützelementen verbunden ist.

Die vorfabrizierten Betonelemente weisen massive Schäden auf, die jedoch in keinem Zusammenhang mit dem Chemismus des angrenzenden Bergwassers stehen.

Bei den Schäden handelt es sich um die Alkali-Aggregat-Reaktion der Zuschlagstoffe mit den Bestandteilen des Zementsteins. Die AAR-Reaktion entsteht nur, wenn die nachfolgenden Randbedingungen gegeben sind:

- reaktives Zuschlagsmaterial umgeben von Zementstein (Alkalien)
- Wasserkontakt und/oder hohe Luftfeuchtigkeit.

Nachfolgend ein paar Schadensbilder.

Betonschäden, die durch die AAR-Reaktion entstanden sind, häufen sich. Am häufigsten zu beobachten ist die Alkali-Silika-Reaktion (ASR), weit weniger häufig tritt auch die Alkali-Karbonat-Reaktion auf (reagiert mit do-



Abb. 1: Schalenförmiges Ablättern des Betons, zusätzlich bemerkt man eine leichte Braunfärbung des Zementsteins.



Abb. 2: Die Aufnahme zeigt Bruchstücke der zerstörten Partien. Der Bruch geht durch die Zuschlagstoffe.

lomitischen Kalkkomponenten). In der Schweiz kann sich der Fachmann auf keine entsprechenden Normen abstützen und ist deshalb darauf angewiesen, die in der Fachliteratur empfohlenen Konzepte zu übernehmen. Die Konzepte basieren in der Regel auf einer Prüfungsmethode der relevanten Gesteine (meist in Anlehnung an die französischen Normen).

In der Fachliteratur werden die folgenden Präventivmassnahmen vorgeschlagen:

- Verwendung von nicht-reaktiven Zuschlägen. Die Abklärung der Reaktivität erfolgt durch:
 - Microbor-Tests
 - vertiefte petrographische Untersuchungen
- Verwendung von im Werk hergestellten Kompositzementen (Zumischung von Mikrosilika, Flugasche oder Hüttensand)
- Erstellen einer umfassenden Alkalienbilanz des Betons

Gestein	Mineral
Plutonite	
Granit	Deformierter Quarz undulös auslöschend,
Granodiorit	verwitterter Feldspat mit Rissen
Vulkanite	
Rhyolith, Dacit, Andesit	Vorkommen von teilweise bis vollständig kristallisierten
Trachitandesit, Basalt	(sauren und basischen) Gläsern; Tridymit; Kristobalit; Opal
Obsidian, vulkanischer	Vorkommen von mehr oder weniger kristallisierten,
Tuff	SiO ₂ -reichen Gläsern, oft mit Mikrorissen
Metamorphite	
Gneis	Undulös auslöschender Quarz, rekristallisierter Quarz;
Schiefer	Risse; verwitterter Feldspat und Glimmer
Quarzit	Quarz in Verbindung mit quarzitischer und Opal-Matrix; rekristallisierter Quarz in Form von undulös auslöschendem Mikroquarz oder Quarz mit Mikrorissen
Sedimente	
Sand- und Siltstein,	Wenig kristallisierte Kieselsäure-Matrix; Risse;
Quarzit	Opal; mikrokristalliner Quarz
Sandige Karbonate	Quarz und silikatische Matrix
Kieselkalke	
Cherts, Silex	Calcedon, Opal
Kalk, Dolomit,	Opal-ähnliches, diffus verteiltes SiO ₂ in Form von
dolomitischer Kalk	Mikroknollen oder eventuell mit Sulfiden und Phylliten assoziiert

Tab. 1: *Hauptsächliche Gesteinstypen und Mineralien, die im Zusammenhang mit AAR auftreten können (SI+A; tec 21 5/19-25).*

- Kontrollen der Betonrezepte durch Performance-Tests
- Wassereintritt vermindern, Luftfeuchte reduzieren.

Weiterführende Literatur zu diesem Thema soll an dieser Stelle gesondert aufgeführt werden.

- Thalmann C. und Wyss Ch. (2000): Betonzuschlagstoffe, die eine Alkali-Aggregat-Reaktion auslösen können – Empfehlungen an die Schweizerische Kies- und Betonindustrie. Die Schweizer Baustoff-Industrie 4/2000.

- TFB-Cementbulletin (2000): Alkali-Aggregat-Reaktion, Teil 1 in Nr. 5/68 (Mai 2000) und Teil 2 in Nr. 9/68 (September 2000).

Literaturnachweis und -verzeichnis

Gerhard Rytz, Chemiker, Dr. phil. nat. SI+A; tec 21 5/19–25; Kurt Strahm, Marketingleiter, Ciment Vigier SA, 2603 Péry, Cédric Thalmann, Ingenieurgeologe, Dr. sc. nat. ETHZ, B-I-G Büro für Ingenieurgeologie, Gurtenbrauerei, 3084 Wabern, Christian Wyss, Geologe, lic. phil. nat., TransGeo, Dorfstrasse, 3084 Wabern, Jürg Zingg, Projektleitender Bauingenieur, Tiefbauamt Kt. Bern, Oberingenieurkreis I, Schlossberg 20, 3601 Thun.

halt (> 1100 mg Na⁺/l) gesehen werden (Natriumsulfat).

Bergwasseruntersuchungen IBB*/ETH 1996–98

Die nachfolgende Darstellung des geologischen Profils des Strassentunnels enthält die Resultate der Bergwasseruntersuchungen im benachbarten Sicherheitsstollen. Dargestellt sind die Messwerte der elektr. Leitfähigkeiten (grüne Punkte), die im Beisein des Instituts Bachema AG vor Ort ermittelt wurden.

Die Messwerte bestätigen die Resultate der Untersuchungen während des Baus des Strassentunnels.

Auf einem grossen Teil des Sicherheitsstollens (Sisto) stossen wir auf ein stärker mineralisiertes Bergwasser. Stark mineralisier-

tes Bergwasser treffen wir – nicht ganz unerwartet – zwischen Tunnelkilometer 4,0 und 5,0 an. In diesem Bereich werden das Mesozoikum wie auch der Nordteil des Permkarbons durchfahren. Den höchsten Mineralisationsgrad erreicht eine Wasserprobe mit einer elektrischen Leitfähigkeit > 6000 µS/cm. Die chemische Analyse dieser Wasserprobe im Labor ergab folgende Wasserinhaltsstoffe (siehe Tabelle 2).

Das Bergwasser vom Typ Na–Ca–SO₄ ist durch Ionenaustausch (Na ersetzt Ca) entstanden. Eine Sulfatherkunft aus Pyrit scheint unwahrscheinlich. Der Hauptanteil an der Bergwasserprobe ist älter als 40 Jahre! Das Einzugsgebiet des Grundwassers dürfte auf einer Höhe > 2300 m über Meeresspiegel liegen.

Die Sulfatgehalte der Wasserproben in unmittelbarer Umgebung (zwischen Tunnelkilometer 4,0 und 5,0) sind ebenfalls hoch (meist > 2000 mg SO₄/l).

Auf die zweite interessante Stelle im Sicherheitsstollen stossen wir bei km 10,0 (ab

*IBB = Institut Bauplanung und Baubetrieb ETH Zürich Hönggerberg

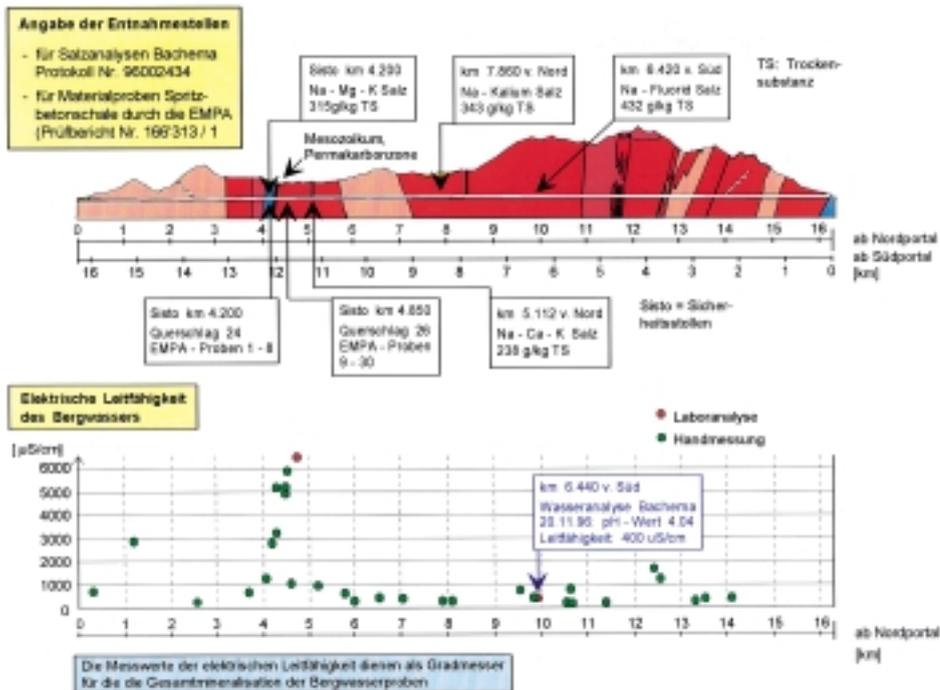


Abb. 2: Längsprofil des Gotthard-Strassentunnels mit Darstellung der elektrischen Leitfähigkeit und der entnommenen Proben.

Hauptionen	}	Ca	mg / l	420	Isotope	}	^3H	(TU)	21 ± 19
		Mg	mg / l	64			$\delta^{18}\text{O}$	(‰)	- 14,13
		Na	mg / l	1500			$\delta^2\text{H}$	(‰)	- 108,2
		K	mg / l	38			Excess		4,9
		HCO ₃	mg / l	82					
		Cl	mg / l	75					
		SO ₄	mg / l	4500					
		F	mg / l	> 6					

Tab. 2: Wasseranalyse der Probe (20 m nördlich des Querschlags 26, km 4,830 ab Nordportal)

Nordportal). Messungen vor Ort durch das Institut Bachema AG in Zürich ergaben einen pH-Wert von 4,02. Dieser sehr tiefe pH-Wert (vgl. dazu Foto rechts) der Wasserprobe, die 10 m südlich vom Querschlag 47 entnommen wurde, wird durch die Beimischung von aufsteigendem CO₂ verursacht. Dies bestätigen auch die nachfolgenden Aufnahmen, auf denen das Entweichen von CO₂ (Gasblasen) deutlich wird.

Die Bergwasserverhältnisse im Gotthard-Strassentunnel sind seit dem Bau stabil und haben sich qualitativ (chem. Zusammensetzung) wie auch quantitativ (Wasseranfall in den einzelnen Zonen) nicht wesentlich verändert.



Abb. 3: pH-Messung im Sicherheitsstollen 10 m südlich des Querschlags 47 (ca. km 6,440 vom Südportal).



Abb. 4: CO₂-Blasen ca. 25 m südlich des Querschlags 47 (ca. km 6,425 vom Südportal).

Materialtechnische Untersuchungen an Bauwerksproben aus dem Sicherheitsstollen

Die hohen Sulfatgehalte der Wasserproben aus dem Sicherheitsstollen, die zwischen Tunnelkilometer 4,0 und 5,0 entnommen wurden, werfen natürlich die Frage nach der Schädigungsgrenze für Stahlbetonbauwerke auf. Deshalb interessierte uns in diesem Abschnitt der Zustand des Strassentunnels und parallel dazu jener des Sicherheitsstollens. Effiziente Untersuchungen des Bauwerkszustandes des Strassentunnels sind nur ohne Verkehr möglich. Der Aufbau des Tunnels ist für derartige Untersuchungen denkbar ungünstig. Denn die Zwischendecke, die Fahrbahnplatte sowie die beidseitig vorgehängten Fassadenelemente verunmöglichen den di-

rekten Zugang zur Kontaktzone Bauwerk/Fels. Deshalb konzentrierten wir uns bei unseren Untersuchungen auf den Zustand des parallel zum Haupttunnel verlaufenden Sicherheitsstollens, da hier die zeitliche und lokale Zugänglichkeit gewährleistet wurde. Besonders auffällig waren jene Zonen im Stollen, bei denen die Spritzbetonverkleidung von weissen Salzausblühungen überzogen war.

Nachfolgend ein paar Aufnahmen:

Viele Salze durchdringen die Spritzbetonschale unbeachtet. Sie gehen keine chemische Reaktion mit dem Zementstein ein oder ihre Reaktion ist wegen des Salzüberangebots zum Stillstand gekommen (z.B. Bildung des Friedelschen Salzes durch Cl-Ionen). Auf der Spritzbetoninnenseite führen die Salze zu verstärkter Korrosion, wobei nicht nur Chlo-



Abb. 5: Weisse Salzausblühungen auf der Innenseite der Spritzbetonauskleidung im Gotthard-Sicherheitsstollen, 20 m nördlich Querschlag 26 (km 4,850 ab Nordportal). Stärke der Verkleidung ca. 4–7 cm.



Abb. 6: km 4,850 ab Nordportal Korrosion der Spritzbetonschale im Sicherheitsstollen. Bildung von Ettringit und Thaumasil.



Abb. 7: Die Salze kristallisieren zwischen Fels und Spritzbeton. Durch den Platzbedarf der Kristalle entstehen Abplatzungen.

ridionen die Korrosion vorantreiben können. Alle negativ geladenen Ionen verstärken die Korrosion (so z.B. auch SO_4^{2-} -Ionen!).

Saures Wasser beschleunigt zudem die Karbonatisierung des Zementsteins und ebnet dadurch den Weg zur Bewehrungskorrosion.

Erstaunlicherweise finden wir bei allen Ablagerungen hohe bis sehr hohe Natrium-

gehalte, gleichzeitig aber sehr tiefe Sulfatgehalte. Daneben kommen zum Teil hohe Gehalte an Fluorid, Kalium und Chlorid vor. Die Anwesenheit von Fluorid gibt Hinweise auf die Genese der mineralisierten Bergwässer. Die Anwesenheit von Chlorid lässt vermuten, dass das ursprüngliche Bergwasser mit grosser Wahrscheinlichkeit hohe Gehalte an Sulfaten enthielt, die beim Durchgang



Abb. 8: Stark korrodierte Ankerplatte und Aufhängung.

durch die Spritzbetonschale chemisch reagierten (Reaktion mit den Hydratationsprodukten des Zementes). Die hohen Kaliumgehalte stammen fast ausschliesslich aus dem Spritzbeton.

Im Beisein und unter der Leitung der Herren Dr. P. Lienemann und Dr. M. Romer der Abteilung anorganische Analytik / Feststoffcharakterisierung der EMPA Dübendorf wurden insgesamt 29 Bauwerksproben aus dem Sicherheitsstollen entnommen und im Labor materialtechnisch analysiert. Die umfassenden Resultate kann der Leser dem Prüfbericht Nr. 166'313/1 der EMPA («Chemische Charakterisierung von Proben aus dem Sicherheitsstollen des Gotthard-Strassentunnels») entnehmen. Dieser Bericht wurde von der EMPA als Fallstudie veröffentlicht.

Auszug aus dem Bericht:

«Die Pulverproben aus dem Sicherheitsstollen des Strassentunnels wurden qualitativ auf ihre chemische Zusammensetzung untersucht. Es konnten verschiedene Salze nachgewiesen werden, die an diversen Stellen in ziemlich reiner Form vorliegen. Neben dem leichtlöslichen Natriumsulfat, das hauptsächlich an der Oberfläche des Spritzbetons gefunden wurde und an dieser Stelle im ursprünglichen Bergwasser enthalten ist, konnten an der Kontaktstelle zum Fels auch die typischen, durch Sulfatwasser hervorgerufenen Zersetzungsprodukte des Betons nachgewiesen werden. Thaumasit, Ettringit und letztlich Gips sind die unter Einwirkung von Sulfaten entstehenden Umwandlungsprodukte des abgebundenen Zementes. Die mit der Phasenumwandlung zu Thaumasit und Ettringit einhergehende grosse Volumenzunahme führt zu einer Treibwirkung und damit zur Zerstörung des Spritzbetons.»

An sehr vielen Proben wurde eine Röntgenfluoreszenz-Spektrometrie (WD-XRF) durchgeführt.

Bei der Röntgenfluoreszenz-Spektrometrie (WD-XRF) handelt es sich um eine qualitative Untersuchung der Partikel auf

ihre chemische Elementzusammensetzung.

Nachfolgend die Resultate einer korrodierten Spritzbetonprobe GT 19, km 2,4830, Querschlag 26:

Mengenanteil: Elemente	
gross	Eisen, Arsen, Silizium
mittel	Schwefel, Kalzium, Mangan, Strontium
klein	Natrium, Magnesium, Aluminium
Spuren	Chlor, Kalium, Kupfer, Titan, Nickel

Tab. 3: Mengenanteile chemischer Elemente bei der Probe GT 19, km 4,830, Querschlag 26.

Bei dieser Probe handelt es sich um eine rostfarbene Ablagerung bei einer stark geschädigten Stelle mit grösserem Wasseraustritt. Die Ablagerungen wurden abgeschabt und direkt als Feststoff gemessen.

Parallel dazu wurde eine Röntgendiffraktion (XRD) durchgeführt

Die Zuordnung der Elemente zu ihren Elementverbindungen erfolgte mit der Röntgendiffraktion. Anhand des Röntgendiffrak-



Abb. 9: Entnahmestelle GT 19, 20 m nördlich des Querschlags 26 (Tunnelkilometer 4,830 ab Nordportal).

Mengenanteil:	kristalline Verbindungen
gross	CaSO ₄ · 2H ₂ O Kalzium-Sulfat-Hydrat (Gips)
mittel	–
klein	CaSO ₄ · 0,5H ₂ O Kalzium-Sulfat-Hydrat (Bassanit)

Tab. 4: Chemische Charakterisierung der Probe GT 19.

CaSO ₄ · 2H ₂ O	Na ₂ O 1%	MgO 0,3%	Al ₂ O ₃ 0,1%	SO ₃ 15%
CaSO ₄ · 0,5H ₂ O	SiO ₂ 4%	K ₂ O 0,1%	CaO 20%	Fe ₃ O ₃ 50%
	As ₂ O ₃ 10%			

Mengenanteilbestimmung mit der Röntgenfluoreszenz-Spektrometrie (WD-XRF):

tionsspektrums konnten in der Probe kristalline Verbindungen nachgewiesen und grob nach ihrem Mengenanteil eingestuft werden.

Die Probe GT 19 steht stellvertretend für sehr viele geschädigte Spritzbetonzonen in der Schweiz. Die Aufnahme zeigt die weissen (für den Spezialisten «altbekannt») kugelförmigen Gipsablagerungen in Verbindung mit roten Eisenablagerungen, die auf das Vorhandensein von kalkaggressiver Kohlensäure im Bergwasser hinweisen. Normalerweise werden neben Gips grosse bis mittlere Anteile Thaumasit und/oder Ettringit nachgewiesen (hier ausnahmsweise nicht der Fall).

Das Bergwasser des Gotthard-Strassentunnels ist demzufolge für Spritzbetonschalen ohne Abdichtung, aber mit Stahlbewehrung bis zu einer Stärke von d ≈ 30 cm stark aggressiv. Mächtigere Spritzbetonschalen reduzieren den zur Korrosion notwendigen Wassertransport in der Schale sehr stark. Massive Betonbauteile d > 0,5 m werden in der Folge fast nur noch über die Oberfläche angegriffen. Es gelten demnach nicht für alle Bauteile die gleichen Aggressivitätsgrenzen für Wasserinhaltsstoffe (vgl. dazu auch das Kapitel Empfehlungen mit der abgeänderten DIN-Norm 4030).

Literaturnachweis und -verzeichnis

- Gotthard- Strassentunnel der Nationalstrasse A2
Ergebnisse der hydrochemischen und isopenhydrologischen Untersuchungen Gotthard Strassentunnel, Hydroisotop GmbH, Schweitenkirchen (D), 6.11.1996
- SI+A Instandsetzung von Tunnels, Schweizerische Ingenieur und Architekten Nr. 40 30.9.1993
- Untersuchungsberichte Nr. 69003070 / Nr. 96002434 / Nr. 96002970, Institut Bachema AG, Zürich Sep.-Dez. 1996
- Geologischer Schlussbericht Gotthard-Strassentunnel, Schweizerische Geotechnische Kommission, Bern 1987

Belchentunnel der Nationalstrasse A2

Allgemeines

Der Belchentunnel wurde vor rund 40 Jahren, 1963–1967, erbaut. Erst am 23. Dezember 1970 wurde im Kanton Baselland die N2 als durchgehende Autobahn von Basel bis Härkingen dem Verkehr übergeben.

Bei einer Gesamtlänge der beiden Tunnelröhren von 2×3180 Meter liegen davon zirka 45% in der geotechnisch schwierigen Formation des Gipskeupers, der Rest in Tonen, Mergeln und Kalkschichten. Der Gipskeuper, ein Konglomerat aus Mergel und Tonen, ist mit Anhydrit durchsetzt. Unter Zugabe von Wasser erfolgt die Umwandlung des Anhydrits zu Gips, wobei sich das Gesteinsvolumen um ca. 60% vergrössert. Wird diese Volumenvergrösserung behindert, entstehen Druckkräfte, die zu massiven Schäden an der Rohbaustruktur führen. Weitere 15% der Tunnellänge (ca. 1000 m) entfallen auf den Opalinuston, der ebenfalls quillt und Schäden verursacht.

Tunnellänge: 3180 m

Ausbau: 2 Röhren, 7 Querschläge zwischen beiden Röhren

Meereshöhe: 618 m ü.M.

Lüftung: 3 Lüftungsschächte

Gesteinsformationen: Malm, Dogger, Lias, Keuper und Muschelkalk

Entwässerungssystem: Schmutzwasser wird über die Fahrbahn mit 1,5% Quergefälle in die Schlitzrinne abgeleitet. Von dort aus erfolgt alle 50 m eine Ableitung mittels Siphon zum Meteorwasserkanal $\varnothing 40$ (Eternitrohr). Das Bergwasser wird in den Klüften gefasst und mit Halbschalen in die Entwässerungsleitung $\varnothing 20$ geleitet. Zusätzlich sind beidseitig in regelmässigen Abständen Stichleitungen angeordnet, die das Bergwasser im Kämpferbereich in die Entwässerungsleitungen ableiten.

Hydrologie

1995 wurden während der Herbstsperrung, im September, umfangreiche Wasseranalysen durchgeführt. Dazu wurden in beiden Tunnelröhren Wasserproben aus

- den durchgehenden Entwässerungsleitungen
- den Pumpenschächten zur Bergwasserspiegelabsenkung
- sowie aus vereinzelt Tropfstellen entnommen.

Längsschnitt mit Geologie

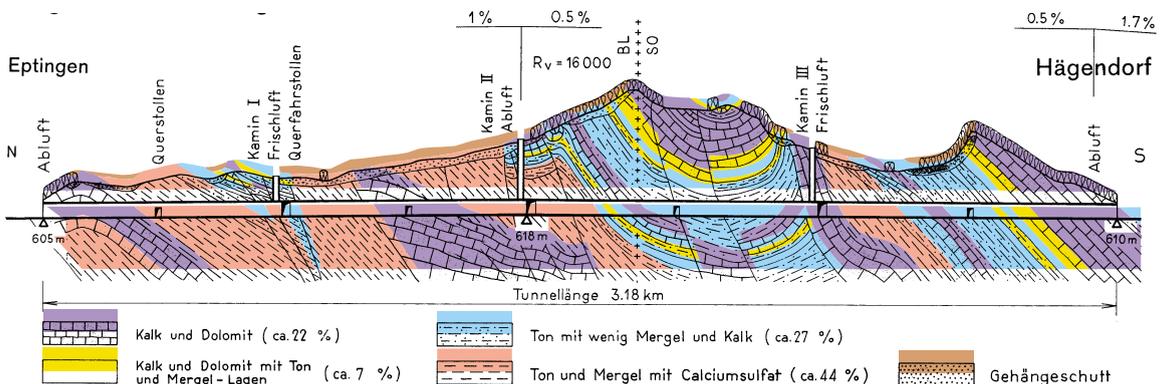


Abb. 1: Längsschnitt und Geologie des Belchentunnels der A2.

Normalprofile 1:75

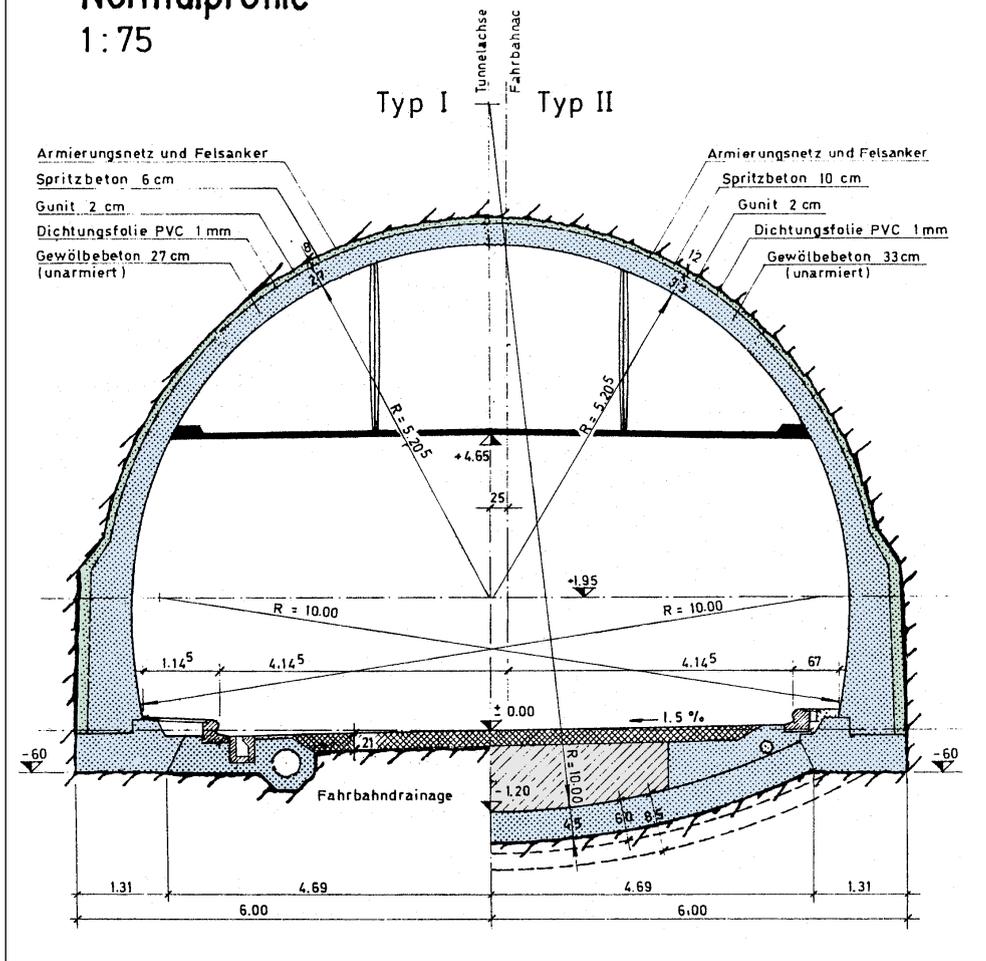


Abb. 2: Querschnitt Normalprofile des Belchentunnels der A2.

Querschnitt: (Typ I)

Ausbruch:	79,1 m ²
Beton:	14,7 m ²
Fahrraum:	46,0 m ²

Abdichtung:
Dichtungsfolie PVC 1 mm
kein Vlies
keine Schutzschichten

Querschnitt: (Typ II)

Ausbruch:	
Sohlgewölbe 45	87,7 m ²
Sohlgewölbe 60	89,1 m ²
Sohlgewölbe 85	91,9 m ²

Beton:	
Sohlgewölbe 45 cm	23,3 m ²
Sohlgewölbe 60 cm	24,7 m ²
Sohlgewölbe 85 cm	27,5 m ²
Fahrraum:	46,0 m ²

		PS 5/20	O 18	PS 8/23	PS 17/10	W 21
pH-Wert		7,5	8,1	12,4	12,7	8,1
el. Leitf.	µS/cm	2560	2820	8720	16'900	4430
Kalzium	mg/l	553	391	343	1,6	174
Magnesium	mg/l	124	19	< 0,1	< 0,1	60
Natrium	mg/l	52	397	1134	2387	1090
Kalium	mg/l	22	17	103	791	33
Chlorid	mg/l	48	16	889	1986	362
Nitrat	mg/l	1,4	3,5	0,88	25	5,9
Sulfat	mg/l	1724	1778	1007	63	2443

PS: Pumpenschacht, **O:** Bergwasserleitung Ø 20 Oströhre, **W:** Bergwasserleitung Ø 40 Weströhre

Tab. 1: Wasserprobenanalysen aus dem Belchentunnel.

Stellvertretend für die grosse Anzahl an Wasserproben hier ein paar Analysenresultate in Tabellenform (Tab. 1).

Die Resultate der Analysen zeigen eine teilweise starke Beeinflussung durch die verwendeten Baustoffe auf. Es stellt sich die Frage nach dem ursprünglichen Charakter des Bergwassers.

PS 5/20, O 18 und W 21

Die Analysenwerte schliessen eine massgebende Beeinflussung durch Baustoffe aus, denn:

- Die pH-Werte liegen im normalen Bereich für Jurawässer
- el. Leitfähigkeiten sind sehr hoch. Die Gründe dafür könnten sein:
 - Partielle Verdunstung des Bergwassers führt zu höheren Salzkonzentrationen.
 - W 21 könnte einen Teil des Natriumchlorids durch den Winterdienst erhalten.
 - Partielle Beimischung von stark mineralisiertem Tiefengrundwasser.
- Die Magnesiumgehalte zeigen normale Werte, ein starker Betonkontakt kann deshalb ausgeschlossen werden.

PS 8/23, PS 17/10

Beide Wasserproben wurden durch die verwendeten Baustoffe stark verändert, obwohl die Bauphase bereits 35 Jahre zurückliegt.

- pH-Wert-Erhöhung durch die Chemikalieninjektionsschleier vor den Pumpenschächten.

- Kalziumkarbonat wurde durch die hohen pH-Werte fast vollständig ausgeschieden.

- Die verbleibenden Ca-Gehalte gehören zum Sulfat, sie bilden den Gipsanteil im Bergwasser.

- Magnesium wurde in beiden Wasserproben durch Ca ausgetauscht (Zementreaktion).

- Die Chloridgehalte sind sehr hoch und lassen sich nur teilweise durch die Verwendung von Streusalzen erklären.

- Der ursprüngliche Bergwassercharakter lässt sich bei diesen Wasserproben nicht mehr herausfinden, da die Beeinflussung durch die Baustoffe zu gross ist.

Fazit: Je nach Entnahmestelle einer Bergwasserprobe stossen wir auf unterschiedliche Wassertypen. Dabei kann der Mineralisationsgrad ohne weiteres um den Faktor 10 variieren. Teilweise hat sich der Charakter einer Wasserprobe derart verändert, dass sich die ursprüngliche Zusammensetzung nicht mehr zurückverfolgen lässt. Oft lassen sich trotzdem Wasserproben-Gruppen bilden, innerhalb derer die Zusammensetzung ähnlich ist. Auch wenn der ursprüngliche Bergwassercharakter verändert wurde, so muss doch jedes Bauteil gegen diese veränderten Wassertypen resistent sein.

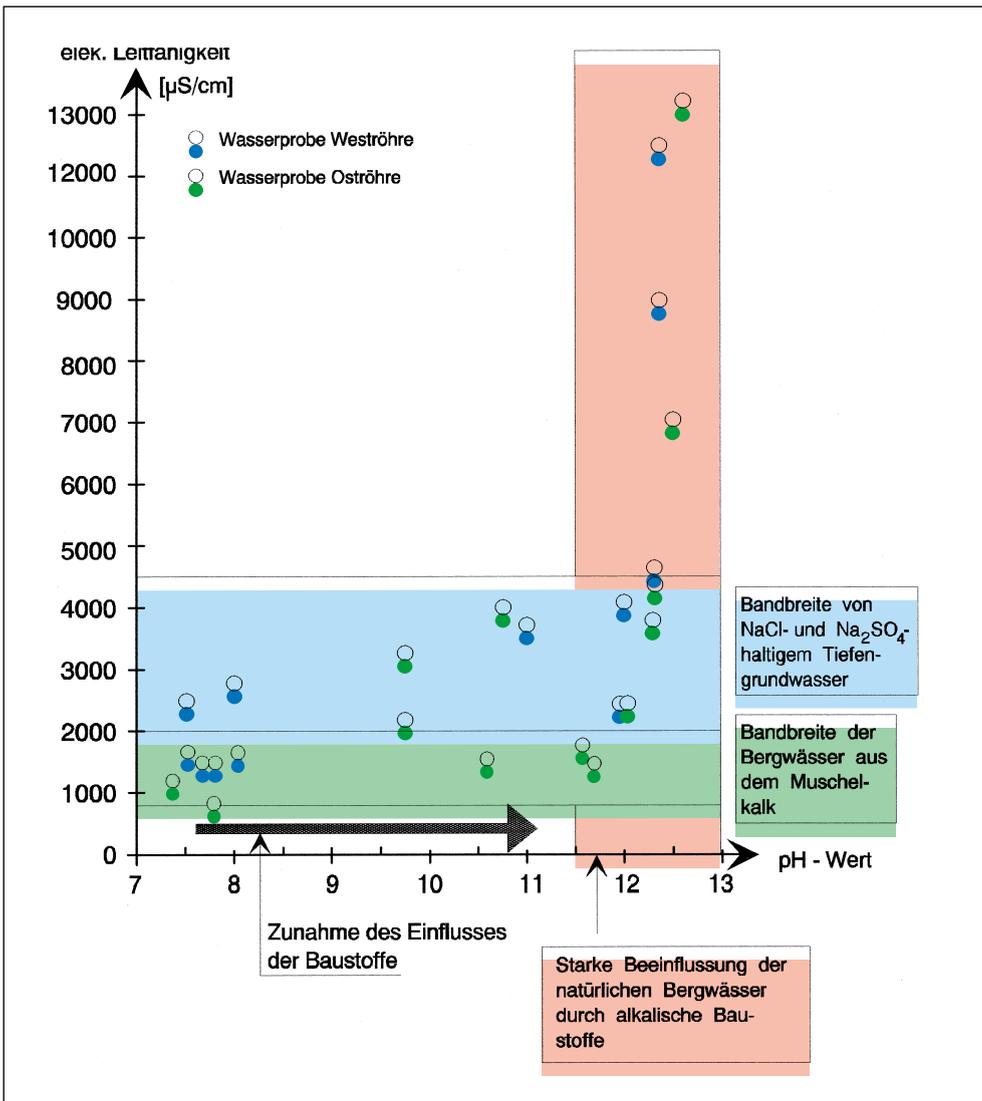


Abb. 3: pH-Wert-Erhöhung des Bergwassers in den Pumpenschächten durch Injektionsmaterial (AM, evtl. Wasserglas und Zement).

Korrosion durch das Bergwasser

Dazu ein Beispiel:

Die Schachtelemente der Pumpensümpfe sind aus Beton. Bei guter Verarbeitung können sie die von ihnen geforderte Lebensdauer ohne Probleme erreichen. Für die Betonschächte sind nur 2 der in Tabelle 1 aufgeführten Wasserinhaltsstoffe massgebend.

Sulfatgehalte bis 1000 mg/l: Durch die Ver-

wendung von «C₃-A-freiem» Zement einerseits und durch die Reduktion der Verdunstung oberhalb des Bergwasserspiegels mit Hilfe eines dichten Luftabschlusses (Gewährleistung einer konstant hohen Luftfeuchtigkeit im Schacht) beschränkt sich das Schadensrisiko.

Chloridgehalte bis 2000 mg/l: Verzicht auf Stahlbewehrung und wiederum Reduktion der Verdunstung.



Abb. 4: Weisse Kalkmilch.



Abb. 5: Entwässerungsleitung \varnothing 20 Oströhre, herkömmliche Kalkablagerungen in mehreren Jahren mit ca. 2% Eisenanteil (rote Farbe).

Andere Baumaterialien wie beispielsweise GUP (Glasfaserverstärkte oder Polyesterbetonelemente) könnten wegen der hohen pH-Werte < 12 schneller Schäden aufweisen. Die hohen pH-Werte werden nicht durch die Schachtelemente selbst verursacht (zu wenig Zement), sondern durch die während der Bauzeit ausgeführten Abdichtungsinjektionen zum Schutze der quellfähigen Gesteinszonen vor dem Eindringen von Bergwasser.

Versinterungsbildung durch das Bergwasser

Ein weiteres Beispiel

Im Bereich des Südportals stösst man auf den Zufluss von weisser Kalkmilch in das Entwässerungssystem. Die weisse Farbe wird durch die CO_2 -Entgasung verursacht, die extrem viele fein verteilte Gasblasen bildet. Pa-

rallel dazu werden sehr hohe Mengen an Kalk ausgeschieden (rund 20 cm in 6 Monaten). Die Herkunft und Genese dieser Wässer ist nicht genau bekannt, dürfte jedoch durch Mikroben im Untergrund verursacht werden.



Abb. 6: Tiefendrainage Weströhre, Ablagerungsbildung in < 6 Monaten, die Kalkmilch (eine direkte Folge der Abb. 4) verursacht 20 cm starke, weisse Ablagerungen.

Der Austritt der Kalkmilch beschränkt sich meist auf wenige eng beieinander liegende Klüfte (Abstand 10–50 m) und dauert solange an, bis als Folge der Kalkablagerung der Zufluss zum Erliegen kommt.

Nun sucht sich das Bergwasser einen anderen Austrittsort und «wandert» auf diese Weise in Abständen von wenigen Monaten von Stelle zu Stelle (z.B. von der Weströhre zur Oströhre und zurück).

In Kürze können dabei mehr als 100 Meter Drainageleitungen vollständig verstopfen. Gerade an diesen Stellen ist der Unterhalt der Entwässerungsleitungen schwierig, kostspielig, aber notwendig, sonst droht der Ersatz der gesamten Leitungen in periodischen Abständen von 10 bis 15 Jahren.

Es liegt die Vermutung nahe, dass das Bergwasser des Belchentunnels im südlichen Teil Methangas enthält, das durch Bakterien abgebaut wird, wobei zusätzlich CO₂ entsteht. Dadurch erhöht sich der Kalkgehalt im Bergwasser, der beim Eintritt in das Entwässerungssystem als Versinterung ausfällt. Die bisher bekannten Methangaslagerstätten verfügen über beachtliche Ausmasse. Der beschriebene Mechanismus der Gasumwandlung wurde zum ersten Mal bei der Erdwärmehochbohrung Nr. 2 in Riehen, also in nicht allzu weiter Entfernung des Belchentunnels, festgestellt und untersucht.

Quelldruck durch Gipskeuper, Opalinuston und Mergel

Seit dem Bau des Autobahntunnels vor rund 40 Jahren bereiten die Gipskeuperschichten in immer kürzer werdenden Abständen grosse, zum Teil sehr grosse Schwierigkeiten. Ungesättigte Gipskeuper-, Opalinuston- und Mergelformationen reagieren bei der Zugabe von Wasser mit einer Volumenzunahme. Die während des Baus aufgefahrene Formationen weisen unterschiedliche Sättigungsgelände bezüglich des max. Wassergehalts auf. Sowohl Opalinuston wie auch Gipskeuperschichten sind in der Regel trocken. Einzelne grosse Klüfte können auch in diesen Formationen beobachtet werden, wobei sich in der

näheren Umgebung dieser Klüfte eine abdichtende Quellschicht bildet, die auf natürliche Art die weiträumige Zirkulation des Bergwassers unterbindet.

Beim Bau und während des Betriebs eines Tunnels in heiklen Gesteinsformationen kommt dem Entwässerungssystem die entscheidende Bedeutung zu. Die Infiltration von Bergwasser in ungesättigte, quellfähige Gesteinsformationen muss mit allen Mitteln verhindert werden. Die Aufgabenstellung ist nicht einfach, denn es handelt sich dabei um ein dreidimensionales Problem.

- Einerseits muss ein funktionstüchtiges Entwässerungssystem die Wasserleitung vom Gewölbe in die Sohle gewährleisten und
- andererseits muss die Längszirkulation des Bergwassers entlang der Tunnelröhre unterbunden werden (wurde bisher stark vernachlässigt).

Während der Projektierung des Belchentunnels konnte man noch nicht auf die heutigen Erkenntnisse zurückgreifen, und deshalb wurden nicht immer optimale Entwässerungssysteme geplant und umgesetzt. Neben weniger geeigneten Systemen kamen aber auch sehr gute und vorausblickende Systeme zum Einsatz. In der Folge werden ein paar Eckdaten beleuchtet:

- Während des Baus des Tunnels wird die Problematik der quellfähigen Zonen erkannt und man suchte nach Lösungen zur effizienten Wasserableitung.

- Es wurden Drainagebohrungen in der Nähe der Formationswechsel zum Gipskeuper erstellt. Die dabei gewonnenen Bergwassermengen waren relativ hoch (Förderung via Pumpen). Mit dieser Massnahme wollte man die Längszirkulation des Bergwassers in quellfähige Zonen unterbinden.

- Vor den Übergängen zum Gipskeuper wurden Injektionsschleier in der Sohle bis auf Höhe Fahrbahn erstellt, die die Längszirkulation des Bergwassers entlang der Tunnelröhre zusätzlich verhindern sollten. Das dabei aufgestaute Bergwasser wurde in seitlichen Fassungen weggepumpt.

- In einem zweiten Schritt wurden vor den Injektionsschleiern sogenannte Sickerschlitze erstellt. Die Sickerschlitze verlaufen

über beide Fahrspuren, reichen bis unter den Sohlbeton und weisen eine Breite von ca. 20 cm auf. Ihre Füllung besteht aus Kies. In der Kiesschicht verlaufen zwei horizontale Drainagerohre, die im Gehwegsbereich an einen Pumpenschacht angeschlossen sind. In diesen Schächten staut sich das Bergwasser bis zu einer definierten Höhe, ehe es von den fest installierten Pumpen wegbefördert wird. In beiden Tunnelröhren wurden 26 Pumpen installiert. Sie ersetzen dabei die Pumpen in den seitlichen Wasserfassungen bei den Injektionsschleiern (Bau während der 70er Jahre).

Leider reduzierte sich in den vergangenen Jahrzehnten die Bergwassermenge, die mit Hilfe der Pumpen gewonnen werden konnte (Reduktion um den Faktor 10).

Fazit: Obwohl das ursprüngliche Entwässerungskonzept laufend ergänzt, erweitert und verbessert wurde, reduzierten sich die fassbaren Bergwassermengen von Jahr zu Jahr.

Parallel dazu erhöhte sich die Zahl der Schadstellen in beiden Tunnelröhren. Als Gründe für den Rückgang der abgeführten Bergwassermengen kommen in Betracht:

- Zwischen der Abdichtungsfolie (PVC 1 mm) und der Spritzbetonschicht wurde kein Drainagevlies eingebaut. Der mögliche Versinterungshohlraum ist damit null. Dies führt zu einem langfristigen Wasserdruckaufbau hinter dem Gewölbe.

- Zur Entlastung und Ableitung des anfallenden Bergwassers hinter dem Gewölbe wurden Stichleitungen \varnothing 50 mm verlegt. Diese münden in rechtem Winkel in beide Bergwasserleitungen. Die Querschnitte der Stichleitungen sind zu klein, konnten nicht unterhalten und gereinigt werden und versintern bei relativ geringer Bergwasserführung recht schnell.

- Als Folge davon wird das Bergwasser nun unter Druck durch die Betonierfugen in den Tunnelhohlraum gepresst. Da sich die beiden seitlichen Bergwasserleitungen \varnothing 20 und \varnothing 40 sehr weit oben befinden, läuft das

Wasser im Sohlbeton auf hohem Niveau (ca. 40–50 cm) unterhalb der Fahrbahn.

- Die beiden seitlichen Bergwasserleitungen \varnothing 20 und \varnothing 40 verfügen über keinerlei Drainageöffnungen (Schlitze oder Löcher) und Gewölbedrainagen wurden keine eingebaut. So kann das Bergwasser nur unter Druck bei den Rohrstössen eintreten. Dadurch staut sich das Bergwasser im Sohlbeton zusätzlich auf, was zu einer verstärkten Längszirkulation führt.

- Die Sickerschlitze, als Barrieren vor den quellfähigen Gesteinszonen, können das Bergwasser immer schlechter aufnehmen, denn durch den Kontakt des Bergwassers mit den Chemikalien-Injektionen erhöht sich der pH-Wert auf Werte >12 . Dadurch verliert das kalkhaltige Bergwasser des Juras seinen gesamten Kalkgehalt, der sich in Form von harten Ablagerungen in den Sickerschichten ablagert. Da die Sickerschlitze bei einer Breite von lediglich 20 cm nicht genügend Versinterungshohlraum aufweisen, versintern sie stark, und die gewonnene Bergwassermenge nimmt kontinuierlich ab.

- Durch den entstehenden Quelldruck deformieren sich die Tunnelröhren. Die dadurch entstehenden Verschiebungen im



Abb. 7: Pumpenschacht eines der 28 Sickerschlitze. Das anfallende Bergwasser fliesst aus der oberen Sickerleitung (Bereich Sohlbeton) zu. In periodischen Abständen wird das Bergwasser abgepumpt.



Abb. 8: Pumpe nach zwölfmonatigem Einsatz im Pumpenschacht. Durch die starken Versinterungen steigt der Unterhaltsaufwand.

Sohlgewölbe betreffen auch beide Bergwasserleitungen. Die Bergwasserleitungen tragen diese Verschiebungen blockweise ab, wodurch sich die Fugen der Rohrstöße öffnen. Durch die offenen Fugen tritt Bergwasser aus dem Entwässerungssystem, an anderer Stelle infiltriert Bergwasser in diese Leitungen. Um diese Wasserverluste/-zutritte quantifizieren zu können, wurden im Oktober 2000 Wasser-

mengenmessungen in den Entwässerungsleitungen des Belchentunnels durchgeführt.

Zielsetzung

Die Wassermengen-Messung sollte Aufschluss über den aktuellen Zustand des bestehenden Entwässerungssystems im Belchentunnel geben. Folgende Fragen standen im Vordergrund:

- Existieren unbekannte Wasseraustrittsstellen aus dem Entwässerungssystem in die Umgebung (Sohlbeton, Fels), und falls ja, wie gross sind diese Verluste [l/min]?
- Existieren Wassereintrittsstellen (z.B. bei Fugen oder schadhaften Stellen der Leitungen) in das Entwässerungssystem?
- Allgemeiner Zustand des Entwässerungssystems?

Untersuchungsprogramm

In der Tunnelmitte, beim Querschlag 4, wurde eine konstante Menge an Zugabewas-



Abb. 9: Element Nr. 80 Blickrichtung Nord, Deformationen im Untergrund werden über die einzelnen Rohrabschnitte abgetragen = undichte Fugen; Absätze. Eternit-Rohr \varnothing 40 (vgl. Abb. 2).



Abb. 10: Wassereintritt im Bereich von Rohrstößen, Eternit-Rohr \varnothing 40 beim Element 196, Blickrichtung Nord.



Abb. 11: Einspeisung von Zugabewasser (FW-Schlauch) und Markierstoff (Dosierpumpe) in die Entwässerungsleitung des Belchentunnels.

ser in das EWS eingespeist (via Hydrantenleitung). Gleichzeitig wurde das Zugabewasser mit einem Markierstoff (über Dosierpumpen) geimpft.

Nach der Installation und Inbetriebnahme der Versuchseinrichtung musste eine Wartezeit von rund 1½ h eingehalten werden, bis sich ein Gleichgewicht im Abflussregime eingestellt hatte.

Nun wurden mit speziellen Wasserfängern die Wassermengen in jedem Schacht des EWS ermittelt und parallel dazu Wasserproben entnommen und daran die Konzentrationen an Markierstoff ermittelt.

Auf der nachfolgenden Doppelseite sind die Resultate dieser Messungen eingetragen.

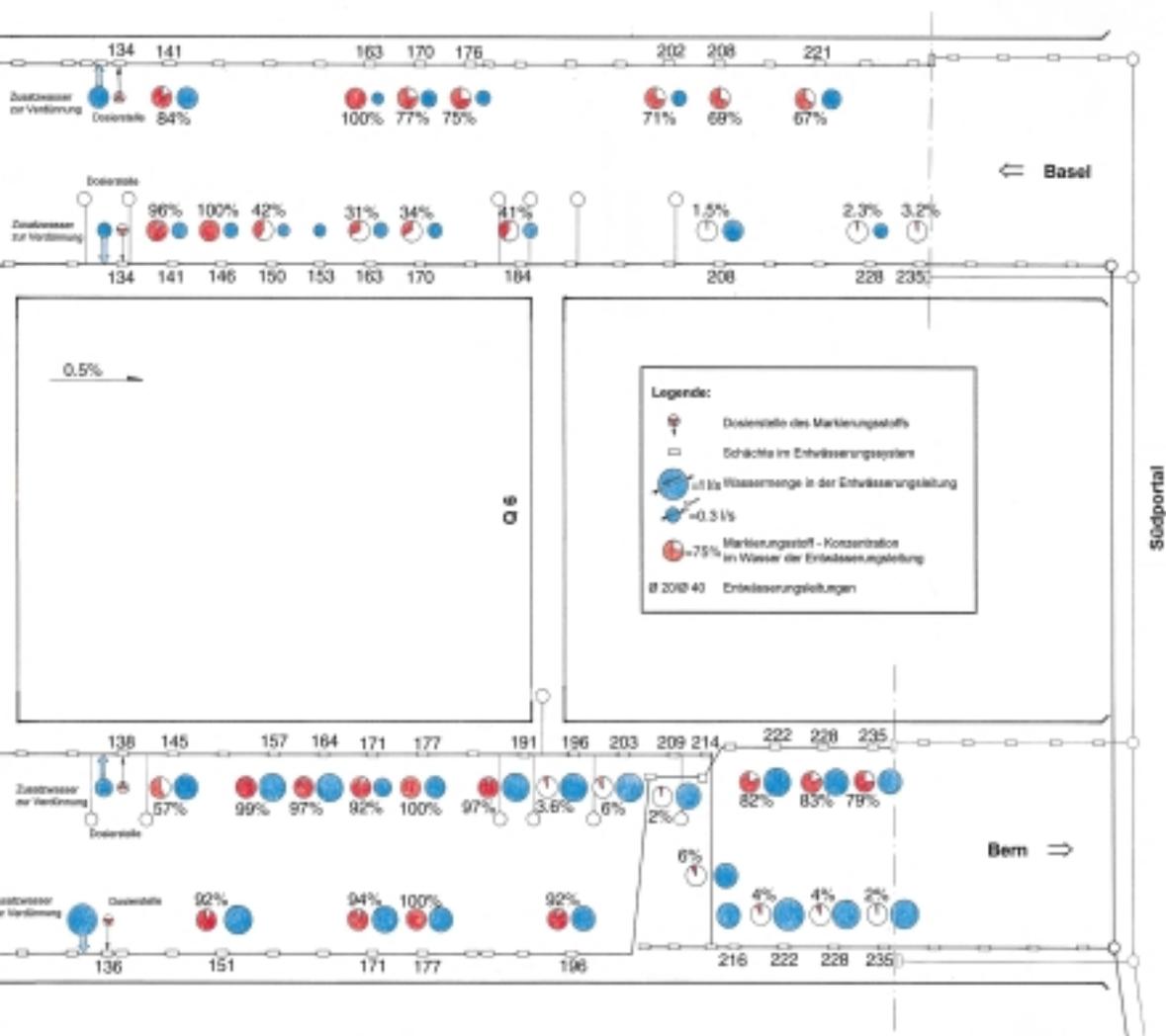
- In jedem Schacht wurden bestimmt: Wassermenge und Konzentration an Markierstoff.

- Die maximale Konzentration an Markierstoff in jeder der acht Entwässerungsleitungen ergab den Spitzenwert (Bezeichnung mit 100%). Die Prozentangaben der restlichen Wasserproben beziehen sich auf diesen Spitzenwert.

Aus der Abnahme der Konzentration an Markierstoff in den Wasserproben lässt sich



Abb. 12: Massive Risse und Druckschäden im Belchentunnel. Breite des Lüftungseinlasses ca. 30 cm.



		Q_{Zugabe} (mit Fw-schlauch ab Hydrantenleitung)	Q_{Portal} (effektiv gemessene Wassermenge beim Portal)	K_{Portal} (Konzentration des Markiergestoffs am Portal) in %	Verlust an Einspeisewasser mit Markierstoff in %
Oströhre Süd	Entwässerungsleitung Ø 40	0,3	0,6	3,2	94
	Entwässerungsleitung Ø 20	0,7	0,5	67	52
Oströhre Nord	Entwässerungsleitung Ø 40	0,25	2	6	52
	Entwässerungsleitung Ø 20	1,5	1,5	87	13
Weströhre Süd	Entwässerungsleitung Ø 40	0,5	1	2	96
	Entwässerungsleitung Ø 20	1,2	0,8	79	47
Weströhre Nord	Entwässerungsleitung Ø 40	0,67	0,65	9	88
	Entwässerungsleitung Ø 20	1	1	50	50

Tabelle 2

die theoretische Wassermenge bei jedem Schacht bestimmen (Idealfall, d.h. ohne Wasserverlust).

$$Q_{\text{theoretisch Schacht } x} = Q_{\text{Zugabe}} \cdot \frac{K_{\text{max.}}}{K_{\text{Schacht}}}$$

$K_{\text{max.}}$	maximale Konzentration des Markierstoffs [Spitzenwert = 100%]
K_{Schacht}	Konzentration des Markierstoffs beim Schacht x
$Q_{\text{theoretisch Schacht } x}$	Rechnerisch bestimmte Wassermenge beim Schacht x
$Q_{\text{Schacht } x}$	effektiv gemessene Wassermenge beim Schacht x
Q_{Zugabe}	Wassermenge, die bei der Zugabestelle in das EWS eingespeist wird

Der Unterschied zwischen der effektiv gemessenen Wassermenge $Q_{\text{Schacht } x}$ und der theoretisch berechneten Wassermenge $Q_{\text{theoretisch Schacht } x}$ ergibt den Wasserverlust [l/min] zwischen Tunnelmitte und dem Schacht x in der untersuchten Leitung.

Resultate

In der Tabelle 2 sind die Wasserverluste eingetragen, die für jede Entwässerungsleitung ermittelt wurden.

$$\text{Verlust [\%]} = 1 - \left[\frac{Q_{\text{Portal}}}{Q_{\text{Zugabe}}} \cdot K_{\text{Portal}} \right]$$

- Die Wasserverluste bei den Entwässerungsleitungen \varnothing 40 betragen im Schnitt 82,5% (Schnitt der 4 Leitungen).

- Die Wasserverluste bei den Entwässerungsleitungen \varnothing 20 betragen im Schnitt 40,5% (Schnitt der 4 Leitungen).

- Die primären Verlustzonen konzentrieren sich auf die Bereiche

- Nordportal – Querschlag 2
- Querschlag 6 – Südportal

Was sind die Folgen der Wasserverluste/-infiltrationen?

- Ungewollte Wasserinfiltration in quellfähige Gesteinszonen (Anhydrit/Opalinuston/Mergel) \Rightarrow Quelldruck

- Lokaler, partieller Wasserdruck auf die Tunnelröhre

- Die Wasserwegsamkeit entlang der Tunnelröhre wird verstärkt.

Bei den bevorstehenden Sanierungsarbeiten ist es deshalb wichtig, die Funktionstüchtigkeit des Entwässerungssystems wiederherzustellen und wo nötig zu verbessern. Dabei wird man aus zeitlichen Gründen gezwungen sein, Prioritäten zu setzen. Dies wiederum setzt eine umfassende Kenntnis der massgebenden Schadensparameter in den verschiedenen Tunnelzonen voraus, denn nur mit einer soliden Grundlagenbasis kann ein geeignetes Sanierungskonzept entworfen und umgesetzt werden.

Literaturnachweis und -verzeichnis

Belchentunnel der Nationalstrasse A2
 Ergebnisse der hydrochemischen und isopenhydrologischen Untersuchungen an Wässern aus dem Belchentunnel, Schweitenkirchen
 24.1.1997
 Untersuchungsbericht Nr. 95001987, Institut Bachema AG, Schlieren 16.10.1995
 Untersuchungsbericht Nr. 95002434, Institut Bachema AG, Schlieren 13.12.1995
 Submissionsunterlagen: Bauliche Gesamterneuerung Belchentunnel, Bau und Umweltdirektion Basel-Landschaft Tiefbauamt 1998

SBB – Alter Hauensteintunnel

Allgemeines

Der Bau des Hauensteintunnels im Herzen der Linie Sissach–Läufelfingen–Olten war um die Mitte des 19. Jahrhunderts ein gewagtes Unternehmen. Die Linie wurde in den Jahren 1857–1858 von der Centralbahn gebaut, als erste schweizerische Linie vom Start weg doppelseitig, wobei die Züge, entgegen der Regel, auf dem rechten Gleis fahren, damit sie auf der Talfahrt Läufelfingen–Sissach das direkt am Berg anliegende Gleis benutzen

konnten, was mehr Sicherheit versprach als die Fahrt am Abgrund.

Beim Bau des Tunnels wurde der Berg von beiden Portalen her angefahren. Um die Arbeit zu beschleunigen, wurden drei Schächte abgeteuft; doch musste einer wegen verheerenden Wassereinbrüchen aufgegeben werden, während das zweite Unglück auf einen Brand im Tunnel zurückzuführen ist. Die Brandkatastrophe forderte 73 Menschenleben, als ein im Schacht hängendes geteertes Seil Feuer fing, das auf die Holzverschalung

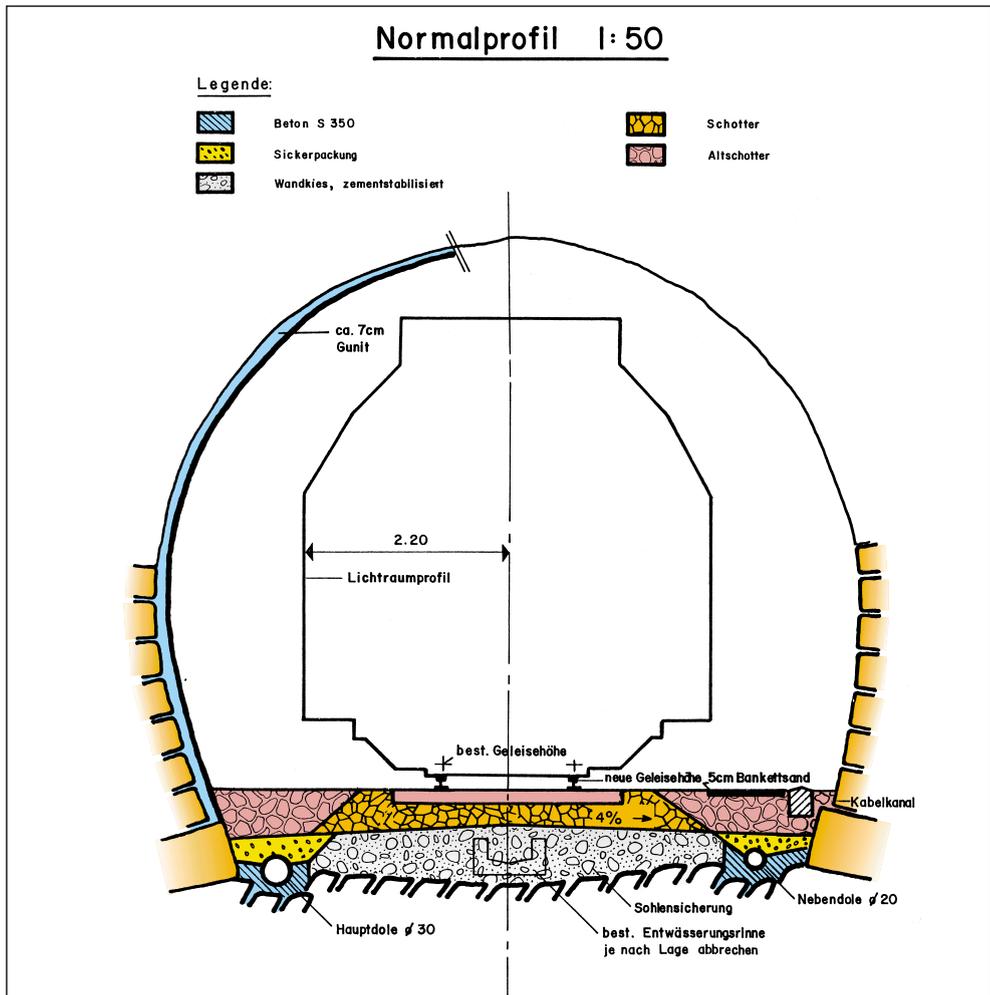


Abb. 1: Sanierungsprojekt 1974–76 entspricht dem aktuellen Zustand.

des Schachtes übergriff, so dass 63 Mann im Stollen erstickten.

Während des Baus wurden verschiedene Wasseradern angefahren, wobei gleichzeitig einige Quellen über Tag versiegten. Nach langen Rechtsstreitigkeiten musste ein ca. 1,3 km langer Stollen unter dem bestehenden Tunnel im Gegengefälle aufgefahen werden, um einen Teil des Wassers nach Läufeufingen rückleiten zu können.

Deformationen des Gewölbes führten zu Einschränkungen des Lichtraumprofils, was mitunter Anlass zum Einspurbetrieb gab. 1953 wurde der elektrische Betrieb aufgenommen. Dabei wurde das Geleise in die Tunnelmitte verschoben, um das notwendige Lichtraumprofil zu schaffen.

Vor der Sanierung des Hauenstein-Basistunnels wurden von August 1974 bis Ende 1976 umfangreiche Sanierungsarbeiten am alten Hauensteintunnel durchgeführt. Dabei wurde der Tunnel mit Gunit abgedichtet, zerstörtes Mauerwerk ersetzt, der gehobene Unterbau stabilisiert sowie eine Fahrleitung eingezogen.

Geologie, Hydrologie

Der Hauenstein und mit ihm verbunden die beiden gleichnamigen Tunnelbauwerke liegen in einem der geologisch kompliziertesten Teile des Kettenjuras mit nahezu alpinen Verhältnissen.

In den Abschnitten mit anstehendem Hauptmuschelkalk konnte beim Bau auf eine Ausmauerung verzichtet werden. Diese Partien überstanden die Zeit, ohne zu Besorgnis Anlass zu geben.

Hingegen haben sich schon während des Baus und in den darauffolgenden Jahrzehnten die mergel- und tonhaltigen Gesteine durch Quellerscheinungen mehr oder weniger unliebsam bemerkbar gemacht.

In hydrologischer Hinsicht ist das Tunnelgebiet sehr interessant. Eine grosse Anzahl Quellen ergiessen sich in den Tunnel, wovon auch eine Reihe von warmen Mineralquellen. Während des Baus wurde der Erguss der kalten Quellen in der Nordhälfte im Mittel

mit 2000 l/min, derjenige der warmen Quellen mit ca. 1900 l/min gemessen. Heute liegt der gesamte Abfluss – nebst dem Wasser, das mit dem Rückleitungsstollen der Wasserversorgung Läufeufingen zugeführt wird – im Mittel um die 2000 l/min (im Maximum bis gegen 3000 l/min).

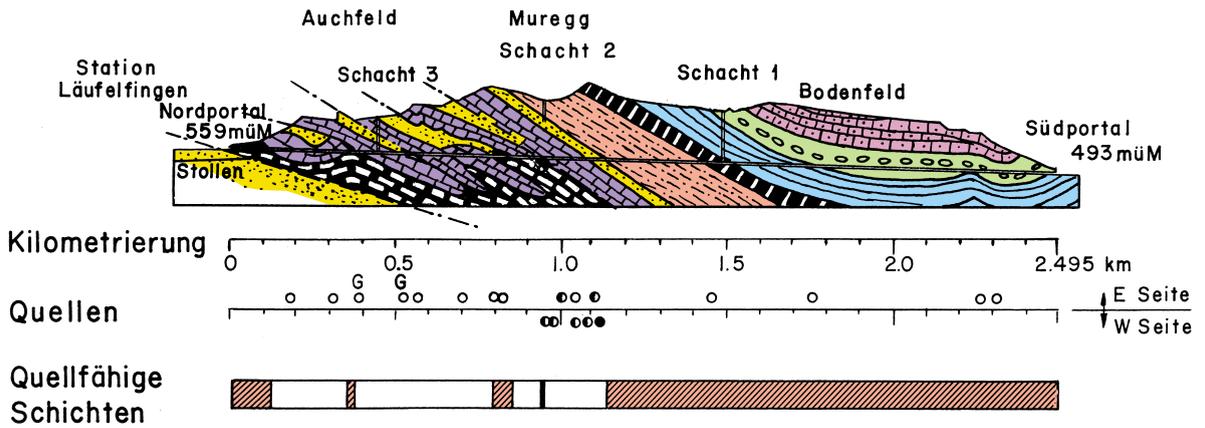
Der Bergwassertyp

Die ersten systematischen Bergwasseruntersuchungen, die zum Ziel hatten, einen Zusammenhang zwischen den Spritzbetonschäden und dem Wasserchemismus zu entdecken, stammen aus dem Jahre 1958.

Insgesamt wurden über den ganzen Tunnel verteilt 12 Bergwasserproben entnommen. Die EMPA-Analyse ergab bei allen 12 Proben hartes bis sehr hartes, sulfathaltiges Gipswasser. Diese Analyse entsprach den Erwartungen der Geologen und auch jenen der Betonexperten, die anhand von zerstörten Gunitrückständen «Ettringitbildung durch Gipswasser» diagnostizierten.

Die zweite Untersuchungskampagne stammt von 1972. Dabei wurden 16 Wasserproben durch die EMPA entnommen. 14 Wasserproben zeigten durch die Analyse den gleichen Wassercharakter wie 1958. 2 Wasserproben unterschieden sich gänzlich dadurch, dass anstelle der Kalzium- und Magnesiumionen (Erdalkalien), Natriumionen (Alkalimetall) getreten waren. So enthielten die Wasserproben denn auch Natriumsulfat und Natriumhydrogenkarbonat anstelle des üblichen Kalziumsulfats und Kalziumhydrogenkarbonats. Die beiden Wasserproben wurden aber aufgrund der geringen Sulfatkonzentrationen als nicht betonaggressiv eingestuft.

Weiter zu erwähnen sind die Untersuchungen aus dem Jahre 1982 an 4 Gunitmörtel- und 2 Wasserproben. Als wichtigste Erkenntnis zeigte sich, dass es sich bei den Zersetzungsprodukten des Gunitmörtels (Alter des Gunits ca. 5 Jahre, Schichtstärke 7 cm, Zementsorte Sulfacem) primär um Thaumasit handelte und Ettringit nur in einer Probe in geringer Menge nachgewiesen werden



Legende :

Geologie	Haupttrogenstein	Keuper
	Unterer Dogger	Oberer Muschelkalkdolomit
	Opalinuston	Hauptmuschelkalk + Unterer Dolomit
	Lias	Anhydritgruppe
	Überschiebung	
Quellen	8 - 15°C	15 - 20°C
	20 - 25°C	Gipsbach-Quellen

Abb. 2: Das geologische Längenprofil zeigt die beiden Problemschwerpunkte deutlich auf. Entweder es treten sulfathaltige wasserreiche Quellen auf oder die Zonen sind quellfähig.

konnte. Interessanterweise wurde in einer Gunitprobe auskristallisiertes Natriumsulfat nachgewiesen. Dies in der Nähe der Stelle (ca. km 32,350), wo 10 Jahre zuvor eine der beiden ungewöhnlichen Wasserproben mit Alkalisalzen entnommen wurde.

Aufgrund der beschriebenen Untersuchungen können die folgenden Schlüsse gezogen werden:

- Im alten Hauensteintunnel existieren mehrere unabhängige Fließsysteme mit mindestens 2 komplett verschiedenen Bergwassertypen.

- Im Normalfall trifft man Kalziumsulfat im Bergwasser an. Dieser Bergwassertyp liefert den Hauptanteil der Gesamtwassermenge. Er zeigt überall starke Tendenz zu Kalkablagerungen! Die Zerstörung der Gunitschicht erfolgt hier primär rein chemisch. Das Hauptzersetzungsprodukt bei nicht sulfatbeständigem Zement und bei sulfatbeständigem Zement ist Thaumasit (Ettringit kommt nur untergeordnet vor).

- An zwei Stellen trifft man auf Natriumsulfat und natriumkarbonathaltiges Bergwasser. Auch wenn dieser Bergwassertyp nur vielleicht 5% der Gesamtwassermenge liefert, beherrscht er ca. 20–30% der Tunnelstrecke. Er hinterlässt **keine nennenswerten Kalkablagerungen**. Die Zerstörung der Gunitschale erfolgt hier primär **rein physikalisch durch die Sprengwirkung** der Alkalisalze. Als Zerstörungsprodukt bilden sich Gunitsplitter, die von der Schale abgesprengt werden.

Wo genau die einzelnen Bergwassertypen im Tunnel anzutreffen sind, kann nur durch Untersuchungen vor Ort bestimmt werden. Wichtiger ist aber die Tatsache, dass alle Stellen, die vor 20 Jahren untersucht wurden, auch heute noch den gleichen Wassertyp liefern, d.h. die verschiedenen Fließsysteme sind im ganzen Tunnel stabil und verändern sich nicht.

Im Hauensteintunnel können seit Jahrzehnten immer wieder die gleichen Scha-

densmechanismen an der Rohbaustruktur beobachtet werden.

Es sind dies:

A: Zerstörung der Gunitschale durch Ettringit- und insbesondere Thaumasitreiben als Folge des Einwirkens von sulfathaltigem Bergwasser.

B: Zerstörung der Gunitschale durch Salzsprengung (Natriumsulfat und Natriumkarbonat) als Folge des Einwirkens von natriumhaltigem Bergwasser.

C: Zerstörung der Mauerwerksfugen durch Salze als Folge des Einwirkens von mineralisiertem Bergwasser.

D: Lokale Quellhebungen in den Mergeln und tonhaltigen Gesteinszonen.

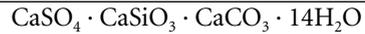
E: Versinterungen im sekundären Entwässerungssystem (Bergwasserleitungen).

Die Versinterungen im primären Entwässerungssystem (Hohlraum zwischen dem Mauerwerk und dem Fels) haben bei diesem Tunnel keinen Einfluss, da der Hohlraum hinter der Gewölbeverkleidung genügend gross ist.

Zerstörung der Gunitschale durch Ettringit- und insbesondere Thaumasitreiben als Folge des Einwirkens von sulfathaltigem Bergwasser

In mehreren Tunnelbauten (SBB – Riesbach, Liesberg, Dettenberg, Hauensteintunnel usw.), deren Bergwässer an diesen Stellen gemeinhin als «harmlos» einzustufen waren, zeigten die chemischen Analysen der Wasserproben Sulfatgehalte zwischen 50–500 mg/l. Wieso wiesen die Spritzbetonabdichtungen bei so niedrigen Sulfatgehalten und zusätzlich bei der Verwendung von «sulfatbeständigen» Zementen die typischen Treiberscheinungen auf?

Thaumasit ist in zementgebundenen Baustoffen eine eher seltene, wasserunlösliche Verbindung mit folgender chemischer Zusammensetzung (variiert je nach Literatur):



Die bisher festgestellten Thaumasit-schäden an Gunit- resp. Spritzbetonabdichtungen zeigen verschiedene Gemeinsamkeiten:



Abb. 3: km 1030: Aufkonzentration des Kalzium- und Magnesiumsulfats hinter der Spritzbetonschale an der Kontaktzone zwischen Fels und Gunit.



Abb. 4: km 1200: zerstörte Spritzbetonschale. Die Zersetzungsprodukte sind Thaumasit, Ettringit, Gips, Kalzit sowie Quarz in unterschiedlicher Zusammensetzung.

Bauwerk	Untersuchungsdatum	Proberesultate	Bericht Nr.	Bergwasseranalyse
Alter Hauenstein-tunnel SBB	seit 30 Jahren permanent	div. Ettringit + Thaumasil	diverse	SO ₄ ca. 500 mg/l
Riesbach-tunnel SBB	27. Jan. 87	Zersetzungsprodukte an der Kontaktfläche Spritzbeton-Mauerwerk	EMPA Nr. 55'568/1	SO ₄ ca. 50–100 mg/l Mg ca. 30 mg/l
Liesberg-tunnel SBB	15. Dez. 86	11 Bohrkern aus Gunit wenig Ettringit, Thaumasil	TFB U. 204–86	SO ₄ ca. 100 mg/l
Dettenberg-tunnel SBB	2. Juli 86	Ablösung des Gunitbelags Grosse Mengen: Quarz viel Kalzit, Kalk, Thaumasil	EMPA Nr. 54'884	SO ₄ ca. 50 mg/l Mg 30 mg/l
Koblenzer Tunnel SBB	11. Okt. 88	Gunit-Mauerwerksproben viel Thaumasil, Quarz und Kalzit	EMPA Nr. 111'458	SO ₄ ca. 80 mg/l
Zimmerberg-tunnel SBB	9. April 85	Gunitstück mit Armierung Grosse Mengen: Kalzit, Quarz viel Thaumasil, Gips	EMPA Nr. 51'624	SO ₄ ca. 50 mg/l
und viele mehr				

Tab. 1: Thaumasil- und Ettringitschäden an Spritzbetonabdichtungen in Bahntunneln.

- In allen Wasserproben kann eine hohe Karbonathärte festgestellt werden.

- Das Bergwasser weist im Minimum 50 mg SO₄/l auf.

- Das Bergwasser enthält relativ viel Magnesium (min. 30 mg/l).

Die nachfolgenden Skizzen eines Natursteingewölbes mit innenliegender Gunitabdichtung veranschaulichen den potentiellen Korrosionsmechanismus.

Der Ablauf der Korrosion

Thaumasil

Der Verdunstungsprozess

- Die Spritzbetonschale hat typischerweise eine Stärke von 7 bis 10 cm.

- Durch den kapillaren Wassertransport werden ca. 30–50 g H₂O / h · m², d.h. ca 1 l / Tag und m² Spritzbetonfläche transportiert.

- Auf der Tunnelinnenseite verdunstet das Wasser, aber die im Bergwasser enthaltenen gelösten Salze bleiben zurück und werden angereichert, bis die Löslichkeit eines der verschiedenen Salze erreicht ist.

- Danach beginnt an der Kontaktfläche Fels-Gunit die Kristallisation und Hydratation der verschiedenen Salze.

Die Hauptbeteiligten:

- aus dem Bergwasser:

Ca, Mg, SO₄, CO₂, HCO₃, OH, CO₃

- aus dem Zement:

Trikalzium- und Dikalziumsilikat

Beispiel einer potentiell gefährlichen Bergwasseranalyse

Temperatur: 8,0 °C

pH-Wert: 7,1

Härtegrad °f

Karbonathärte 26,3

Nichtkarbonathärte 40,5

Gesamthärte 66,8

Kalkhärte 44,6

Magnesiumhärte 22,2

Sulfat 390 mg/l

freies CO₂ 40 mg/l

Kalziumsulfat 249 mg/l

Magnesiumsulfat 266 mg/l

Rest 1 mg/l

Das ursprüngliche Bergwasser wird durch den jahrzehntelangen, gleichgerichteten Feuchtigkeitstransport durch die Schale mit Verdunstung auf der Tunnelinnenseite sehr stark verändert. Bei unseren Untersuchungen ist aufgefallen, dass Thaumasil, als Zersetzungsprodukt in der Kontaktzone zwischen Fels und Spritzbetonschale, immer

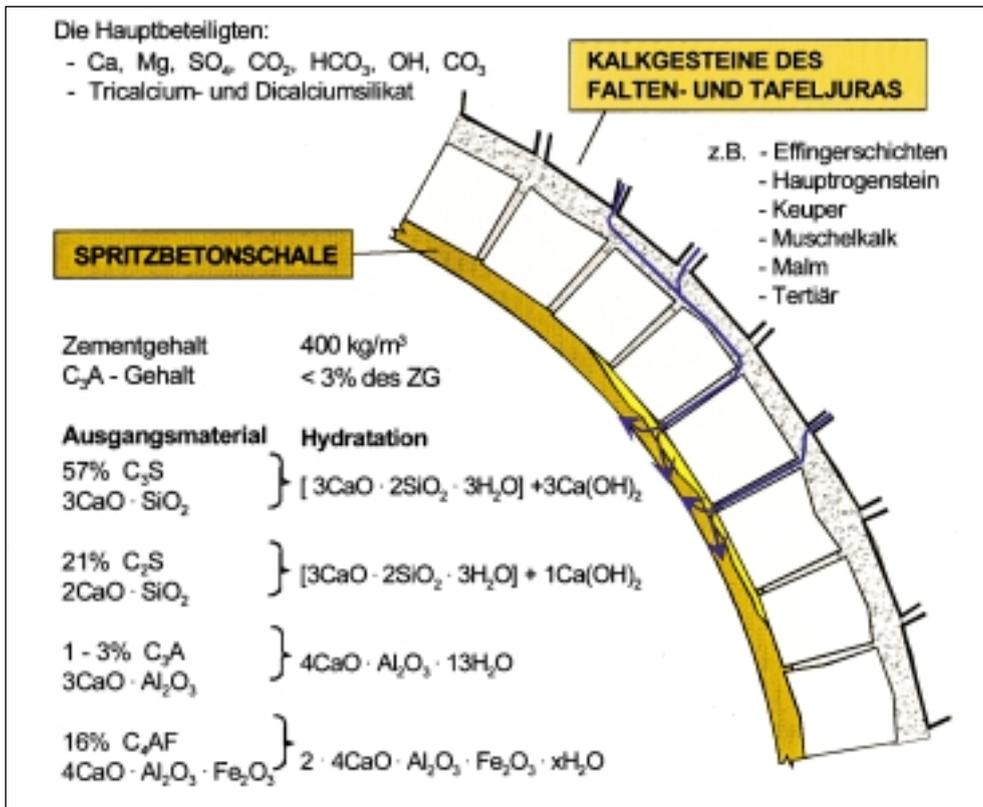


Abb. 5: Verdunstungsprozess in dünnwandigen Spritzbetonschalen.

dann in grossen Mengen nachgewiesen wurde, wenn das ursprüngliche Bergwasser viel Magnesium (min. 30 mg/l) enthielt. Magnesium ist aber in keinem der verschiedenen Zersetzungsprodukte als Bestandteil enthalten. Magnesium kann aber als Katalysator die Korrosionsgeschwindigkeit entscheidend beeinflussen. Durch die Anreicherung der Wasserinhaltsstoffe in der Kontaktzone zwischen Fels und Spritzbetonschale wird die Löslichkeit der verschiedenen «Salzkombinationen» stufenweise übersritten. Die Löslichkeiten der einzelnen Salze beeinflussen sich gegenseitig (Wechselwirkung untereinander), und gleichzeitig reagieren die Salze mit den Hydratationsprodukten des Zementes und den Zuschlagstoffen. Durch die Anwesenheit von Magnesium wird die Löslichkeit des Sulfates und gleichsam des Kalks stark erhöht. Dadurch wird die Löslichkeit von CaSO₄ (Gips) über-

Zu Abb. 5 lässt sich zusammengefasst sagen:

Kalziumhydroxid wird aus dem Bindemittel durch Kohlensäureaufnahme aus dem Wasser herausgelöst. CaCO₃ und das gelöste CaHCO₃ im Wasser wird durch Abgabe der Kohlensäure als Kalziumkarbonat ausgefällt.

Kalziumoxid wird aus Trikalzium- und Dikalziumsilikat des Bindemittels herausgelöst, bis Kalziumsilikat entsteht. Letzteres bildet mit dem ausgefallenen Kalziumkarbonat und dem Gips aus dem Bergwasser die wasserhaltige Verbindung Thaumasil.

sritten. Es kommt zu massiven Gipsablagerungen an der Kontaktzone Fels-Spritzbeton. Der Sulfatlieferant ist dabei das Bergwasser. Die Kalziumionen stammen zuerst aus dem Bergwasser und, wenn dieses an Ca-Ionen verarmt, im zweiten Schritt aus den Hydratationsprodukten des Zementsteins. Kalziumoxid wird aus Trikalzium- und Dikalziumsi-

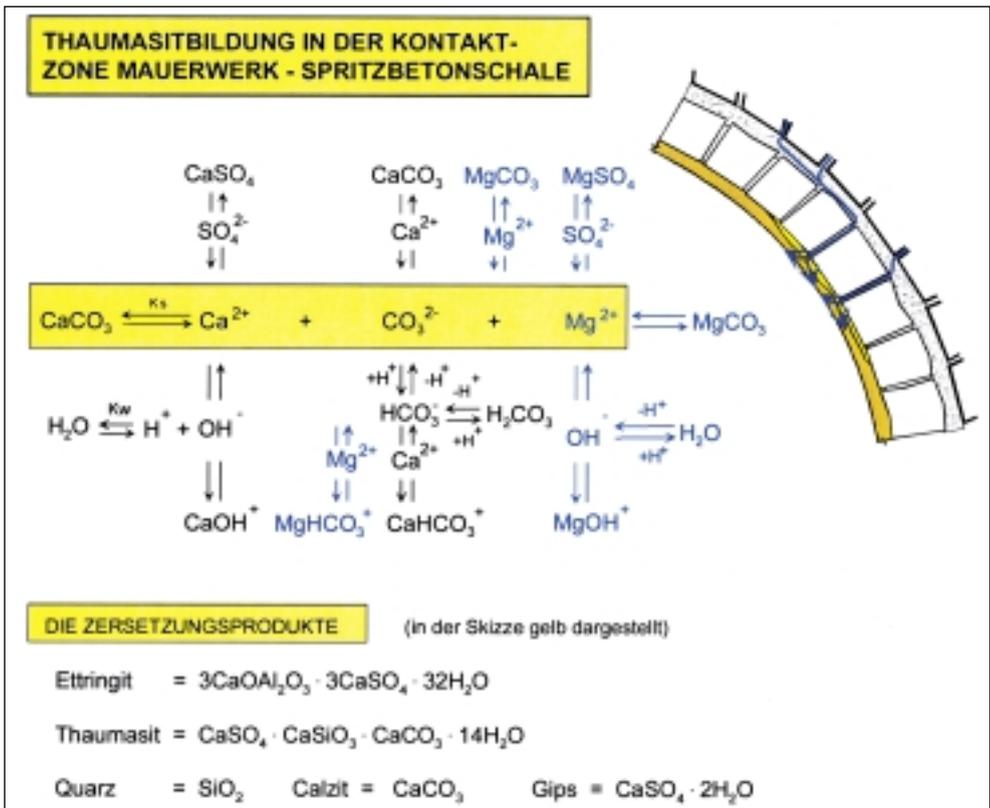


Abb. 6: Chemische Prozesse bei langdauerndem Kontakt von Spritzbeton mit sulfathaltigen Wässern.

kat des Bindemittels herausgelöst, bis Kalziumsilikat entsteht. Dadurch kann mit ausgefällttem Kalziumkarbonat und Gips die wasserhaltige Verbindung Thaumasit entstehen. Es entsteht ein komplexer Reaktionsmechanismus, der noch immer nicht bis in alle Details erklärt werden kann. Die Untersuchungen der EMPA an den 29 Proben aus dem Gotthard-Strassentunnel (vgl. dazu das Fallbeispiel Gotthard) wiesen aber als Zersetzungsprodukte, neben Thaumasit und Ettringit, interessante Salze nach: NaSO_4 , Ca_2SO_4 , CaCO_3 und $\text{Mg}(\text{OH})_2$ in grossen Mengen sowie SiO_2 sehr oft in kleinen Mengen.

Verschiedene bereits veröffentlichte Arbeiten zeigen, dass die Kombination von kohlensaurer Bergwässern (d.h. mit einem grossen Anteil kalkaggressiver Kohlensäure) mit hohem Sulfatgehalten (wie beispielsweise im Gebiet des San Bernardino-Tunnels) die Thaumasitbildung stark fördert.

Der skizzierte Korrosionsmechanismus kann verhindert werden, wenn es gelingt, die Anreicherung der Wasserinhaltsstoffe im Bergwasser an der Kontaktzone zu stoppen oder stark zu erniedrigen. Dies könnte am einfachsten durch die Reduktion bzw. Unterbindung des Feuchtigkeitstransports durch die Auskleidungsschale erreicht werden (Einbau einer wasserundurchlässigen Sperre/Abdichtung der Erhöhung der Dicke der Spritzbetonschale zur Reduktion des Wassertransports usw.).

Physikalische Zerstörung durch Natriumsulfat und Natriumkarbonat

Das Bergwasser im alten Hauensteintunnel zeigt nicht überall die gleiche Zusammensetzung. Neben dem dominierenden Anteil an Erdalkaliwässern (Gips- und Magnesiumsul-

		Kristallisationsdruck [N/mm ²]			
		C/Cs = 2		C/Cs = 10	
		0 °C	10 °C	0 °C	10 °C
Na ₂ SO ₄ + 10 H ₂ O	Natriumsulfat Glaubersalz	7,2	8,3	23,4	27,7
Na ₂ SO ₄	Natriumsulfat Thenardit	29,2	34,5	97,0	115,0
Na ₂ CO ₃ + 10 H ₂ O	Natriumkarbonat Nitrid	7,8	9,2	25,9	30,8
Na ₂ CO ₃ + 7 H ₂ O	Natriumkarbonat Soda	10,0	11,9	33,4	36,5
Na ₂ CO ₃ + 1 H ₂ O	Natriumkarbonat Thermonatrit	28,0	33,3	93,5	110,9

Tab. 2: Mögliche Sprengzyklen (C/Cs = Übersättigungsgrad der Versuchslösung).

fat) treffen wir untergeordnet auch alkalische Wässer an, deren Hauptbestandteile Natriumsulfat und Natriumkarbonat sind. Entsprechend dem unterschiedlichen Bergwassercharakter verläuft auch die Zerstörung der Spritzbetonschale in diesen Zonen anders ab.



Abb. 7: km 1330: Natriumsulfatkristalle rieseln im entstandenen Hohlraum zwischen der Gunitschale und dem Natursteinmauerwerk herunter. Damit sich ein solches Schadensbild ausbilden kann, sind erhebliche Natriumkonzentrationen im Bergwasser erforderlich (Na > 100 mg/l).

Natriumsulfat und Natriumkarbonat haben die Eigenschaft, bei der Kristallbildung sehr hohe Kristallisationsdrücke zu erzeugen, denen kein Beton gewachsen ist. Wiederum steht die Spritzbetonschale in direktem Kontakt mit dem Bergwasser, und der kapillare Feuchtigkeitstransport führt zu einer Anreicherung der Salze in der Spritzbetonschale.

Zur Kristallisation kommt es, wenn die Lösung für ein bestimmtes Salz im vorhandenen System übersättigt wird. Das Salz kristallisiert, und es kommt zur Salzsprengung,



Abb. 8: Bei starker Verdunstung wandert die Kristallisationsfront in das Mauerwerk/Fels zurück, sodass sich der Kristallisationsdruck bereits in den Felsklüften aufbauen kann. Dadurch können grosse Felsbrocken (Bild) mitsamt Gunitschale abgesprengt werden.



Abb. 9: Das grosse Bruchstück von Abbildung 8 löste sich an dieser Stelle im Gewölbe.



Abb. 10: Flächenhafte Ablösung der Guniterschale durch die Anreicherung der Mineralsalze zwischen Felsuntergrund und Guniterschale.

wenn die Salzkristalle gegen die Porenwand drücken. Der dabei entstehende Sprengdruck hängt im Wesentlichen von der Temperatur und der Konzentration der Salzlösung ab, wobei der Druck etwa jenem von gefrierendem Wasser entspricht (der Mechanismus der Frostsprengung verläuft aber grundlegend anders als jener der Salzsprengung). Bei hohen Konzentrationen führt der Vorgang unweigerlich zu einer mechanischen Zerstörung des Porengefüges. Tabelle 2 zeigt einen kurzen Überblick über die möglichen Sprengzyklen.

Die Parameter, welche die Korrosionsgeschwindigkeit bestimmen, sind im Wesentlichen die gleichen wie jene, die für die chemische Zerstörung durch Kalzium- und Magnesiumsulfat massgebend sind.

- C/C_s = Übersättigung der Lösung
- Verdunstungsrate l/m^2h
- Dichte der Spritzbetonschale
- Bergwassermineralisation



Abb. 11: Die Fugen zwischen den grossen Natursteinquadern sind wegerodiert. An ihre Stelle sind Mineralsalze getreten. Befinden sich die entsprechenden Steine im Gewölbe, droht der «Absturz» (Bsp. SBB-Bözbergtunnel) einzelner Bruchpartien.

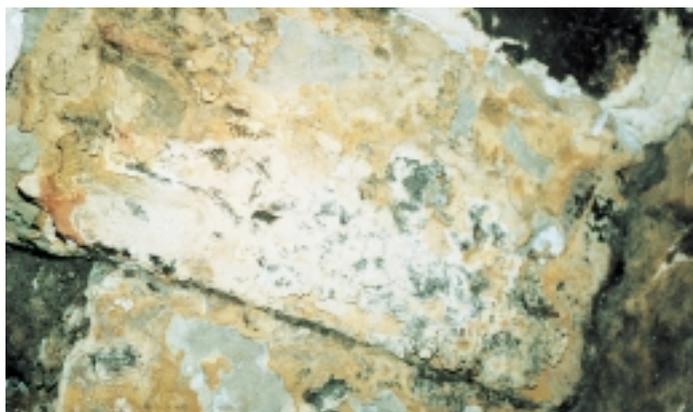


Abb. 12: Nicht nur die Fugen, auch die Natursteine selbst sind der Korrosion durch die Mineralsalze unterworfen.

Der analoge Schadensmechanismus kann am Natursteinmauerwerk beobachtet werden. Dort tritt einerseits schaliges Abblättern der Oberfläche durch Salzsprengung auf, und andererseits, was noch schlimmer ist, werden die Fugen zwischen den Natursteinen zersetzt. Die Fugen zwischen den Natursteinen können durch Sulfatreiben und durch die Kristallisation der Wasserinhaltsstoffe (infolge laufender Verdunstung) vollständig aufgelöst werden. Kristallisationsschäden können vor allem in den Zonen mit natriumhaltigem Bergwasser beobachtet werden. Bei der Kristallisation entwickeln die Natriumsalze besonders hohe Sprengdrücke.

Quellen von Tonmineralien und/oder Anhydrit



Abb. 13
km 1150: Deformierter Bereich der Spritzbetonschale über dem Widerlager mit Leitungskanal davor. Es zeigt sich, dass auch heute noch viele Druckzonen im Tunnel aktiv sind. Zonen mit Anhydrit neigen dazu, bei Wasserkontakt zu quellen. Maximales Quellvermögen ergibt sich bei 10–15% Tongehalt im Anhydrit. Die Quellvorgänge sind auch 150 Jahre nach dem Bau des Tunnels nicht restlos abgeklungen.

Literaturnachweis und -verzeichnis

- Rekonstruktion des Oberen Hauensteintunnels,
A. Golta Ingenieurbüro, Zürich Dez. 1974
- Bericht über chemische Wasseruntersuchungen,
Institut Bachema AG, Zürich 21.12.1981
- Untersuchungsbericht EMPA Nr. 32'234, EMPA
Dübendorf 4.6.1958
- Untersuchungsbericht EMPA Nr. 25401, EMPA
Dübendorf 4.9.1972
- Untersuchungsbericht EMPA Nr. 46'266, EMPA
Dübendorf 25.6.1982
- Untersuchungsbericht EMPA Nr. 51'624/1, EMPA
Dübendorf 18.6.1985
- Alter Hauenstein, Schäden am Tunnel und am
Gunit, Ingenieurbüro W.Galli, Glattbrugg
22.1.1993

SBB-Rosenbergtunnel

Der zweispurige Rosenbergtunnel der Schweizerischen Bundesbahnen liegt an der Strecke St. Margrethen–St. Gallen und verbindet die beiden Bahnhöfe St. Fiden und St. Gallen. Der 1466 m lange Tunnel unterquert städtisches Gebiet und weist eine Überdeckung zwischen einem und 44 Metern auf (Abb. 1). Er wird heute täglich von 180 Reise- und Güterzügen der Bodensee-Toggenburg-Bahn und der Schweizerischen Bundesbahnen befahren. Er wurde in den Jahren 1905–1912 gebaut und ersetzt, bedingt durch die damalige bauliche Entwicklung der Stadt St. Gallen, die alte oberirdische Linienführung der Bahn. Bereits beim Bau des Tunnels traten im Mittelbereich grosse Sohlhebungen auf, und es mussten noch vor der Inbetriebnahme auf einer Länge von 590 m Sohlgewölbe eingebaut werden. Mit der Elektrifizierung der Bahnstrecke im Jahre 1924 wurden zum Schutz der neuen Fahrleitungen nasse Mauerwerkspartien im Gewölbe abgedichtet. Seither wurden nur noch

unwesentliche Unterhalts- und Reparaturarbeiten ausgeführt.

Sanierungsprojekt

Die baulichen Schäden und Mängel bildeten nebst den ungenügenden Profilverhältnissen und der weiterhin zunehmenden Zugfrequenz den Hauptgrund für den Entscheid zur Gesamt-sanierung des Rosenbergtunnels. Als Ziel wurde eine Nutzungsdauer des Bauwerks um weitere 50 Jahre ins Auge gefasst. Das Sanierungsprojekt wurde wie folgt umgesetzt (Abb. 2):

Gleisabsenkung und Optimierung der Gleisgeometrie: Für die Verbesserung der Lichtraumprofilverhältnisse und der Fahrdrathöhe mussten beide Gleise zwischen 30 und 40 cm abgesenkt werden. Gleichzeitig waren zugunsten eines verbesserten Fahrkomforts Gleisverschiebungen bis zu 20 cm erforderlich.

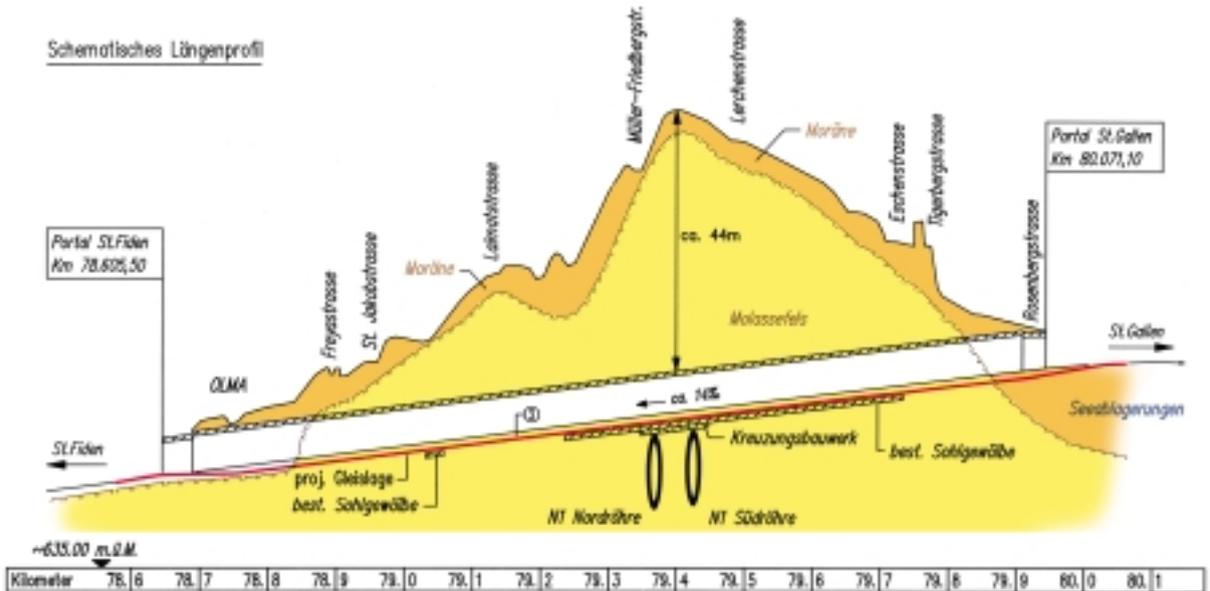


Abb. 1: Längsprofil durch den Bahntunnel.

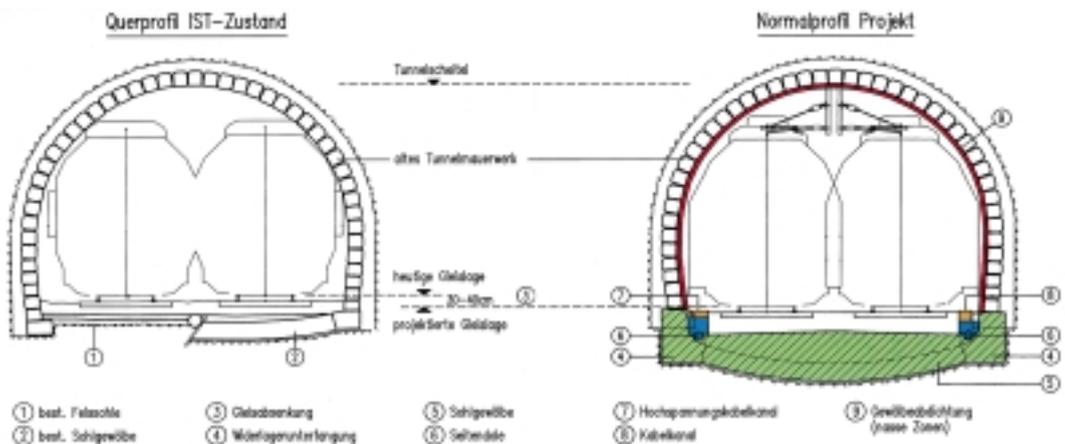


Abb. 2: Normalprofile IST-Zustand und Projekt.

Sohlgewölbe und Unterfangungen: Bedingt durch die Gleisabsenkung mussten die Sohle und damit das alte Sohlgewölbe bzw. das anstehende Fest- und Lockergestein abgetragen werden. Als Trennung zwischen Untergrund und Schotterbett wurde durchgehend ein neues Sohlgewölbe eingebaut. Das Sohlgewölbe soll erneute Sohlhebungen aufgrund der quellfähigen Mergelschichten verhindern.

Entwässerung Tunnelsohle: Entlang beider Tunnelwiderlager werden neue Sickerleitungen verlegt. Sie fassen das über spezielle Entlastungsbohrungen in den Widerlagern einfließende sowie das hinter der Gewölbedichtung durch das Tunnelmauerwerk infiltrierende Bergwasser und leiten es der Vorflut zu. Durch den ungehinderten Zufluss des Bergwassers in den Tunnel bleibt der Wasserhaushalt im Gebirge unverändert, und die Gefahr eines Wasseraufstaus hinter dem Tunnelbauwerk kann minimiert werden.

Untersuchungen zum Bergwasser

In der näheren Umgebung des Rosenbergtunnels existieren verschiedene Mineralquellen. Die Mineralquellen von Walzenhausen, Unterrechenstein, Gontenbad und Rietbad liefern alle in etwa den gleichen Wassertyp. In der Regel sind es Natrium-Hydrogenkarbo-

natwässer mit geringer Gesamtmineralisation, wenig Sulfat und Chlorid, aber mit deutlich Schwefelwasserstoff (Reduktion des Schwefels durch anaerobe Bakterien).

Zu Beginn der Untersuchungen im SBB-Rosenbergtunnel lagen Analysewerte aus einem Schacht der Tunneldole (Nähe Westportal) vor, die ungewöhnlich hohe Gehalte an Wasserinhaltsstoffen auswiesen. Es waren dies:

pH-Wert	10,4
elektrische Leitfähigkeit [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	9020
Karbonathärte [$^{\circ}\text{FH}$]	0,7
Gesamthärte [$^{\circ}\text{FH}$]	0,7
Chloride [mg/l]	685
Natriumhydrogenkarbonat [mg/l]	1207
Natriumkarbonat [mg/l]	2571
Kalziumkarbonat [mg/l]	7
Natriumchlorid [mg/l]	1129

qualitative Prüfung auf:

Natrium	sehr viel
Kalium	viel

Aufgrund des hohen pH-Werts und des erhöhten Kaliumgehalts könnte man in einer ersten Beurteilung die Wasserprobe als Betonsickerwasser, d.h. durch Beton beeinflusstes Bergwasser, bezeichnen. Dagegen sprachen aber verschiedene Faktoren.

Durch den Bau des Bözbergtunnels wurde versehentlich eine Wasserprobe analysiert,

pH-Wert	12,72	} sehr hohe Alkalität sehr hohe Mineralisation stark Kalzium ausgefallen Magnesium wurde gegen Kalzium ausgetauscht deutlich weniger als Kalium Gehalt relativ hoch relativ hoch sehr hoch >> Natriumgehalt
elektrische Leitfähigkeit [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	13'000	
Säurekapazität bis pH 4,3 mmol/l	50,6	
Karbonathärte [$^{\circ}\text{fH}$]	2,5	
Kalzium	14	
Magnesium	nicht nachweisbar	
Natrium	107	
Sulfat	756	
Chlorid	88	
Kalium	2437	

Tabelle 1: Analyseresultate einer Wasserprobe mit starker Zementbeeinflussung.

die einen hohen Anteil an Zementmilch enthält. Hier die Analysewerte:

Der Vergleich der beiden Wasserproben zeigt deutlich dass es sich bei der Wasserprobe aus dem Rosenbergtunnel nicht um «zementbeeinflusstes Bergwasser» handeln kann, da trotz der hohen Mineralisation der pH-Wert viel zu tief, der Natriumgehalt zu hoch (insbesondere >> Kaliumgehalt) und der Chloridgehalt ca. 10-fach zu hoch liegt. Es scheint sich vielmehr um Bergwasser zu handeln, das über längere Zeit mit Beton in Kontakt stand, dabei nicht allzusehr beeinflusst wurde und durch Verdunstungsprozesse eine sehr hohe Mineralisation erreicht hat.

Zur weiteren Abklärung wurden in einem ersten Schritt verschiedene Wasserproben aus den Schächten der Entwässerungsleitung und von Tropfstellen entnommen und analysiert.

Die Analysen ergaben oft hohe Gehalte an Natriumchlorid, Natriumsulfat und Natriumhydrogenkarbonat. Zusätzlich war der Einfluss zementgebundener Baustoffe im

Hintergrund allgegenwärtig, und die Verfälschung der Resultate durch Verdunstungsprozesse musste berücksichtigt werden. Die Analysewerte verdeutlichen jedoch die Gefahr der Korrosion von Stahlarmierungen, und zudem musste mit Schäden durch Salzsprengung in der Spritzbetonabdichtung gerechnet werden.

Weitere Abklärungen führten zum Schluss, dass im Rosenbergtunnel nicht allein oberflächennahes Niederschlagswasser, sondern auch aufsteigendes Tiefengrundwasser vom Typ Natrium-Hydrogenkarbonat eintritt. Die Erfahrungen beim Bau der A1 zwischen Winkeln und dem A1-Rosenbergtunnel deuteten ebenfalls in diese Richtung; dort stiess man auf artesisch gespanntes Tiefengrundwasser.

Umfassende Untersuchung

Das Hauptziel der nun folgenden weiteren Untersuchungen bestand darin, den Tunnel

Analyse Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
pH-Wert	9,73	9,64	7,69	9,06	7,84	7,94	7,69	8,07
el. Leitfähigkeit [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	10 730	7980	2710	2420	1554	4200	1461	374
m-Wert	64,90	108,05	6,60	5,42	8,12	1,40	4,60	1,68
Kalzium [mg/l]	1,6	1,5	153	6,1	88	224	87	47
Magnesium [mg/l]	0,98	1,3	29	1,4	3,9	3,2	29	7,2
Natrium [mg/l]	378	2028	444	519	283	714	190	13
Kalium [mg/l]	1883	536	55	53	7,0	84	23	9,3
Chlorid [mg/l]	14	69	490	34	33	1017	313	13
Sulfat [mg/l]	197	100	410	832	470	585	88	56
Fluorid [mg/l]				ca. 2–3				

Tabelle 2: Resultate der Wasserprobenanalysen aus verschiedenen Tunnelbereichen.

dem Bergwassercharakter entsprechend in Zonen einzuteilen und die zugehörigen technischen Massnahmen festzulegen. Zu diesem Zweck wurde ein detailliertes Messprogramm festgelegt:

Im Abstand von mehreren Monaten wurden aus allen Schächten der Tunneldole Wasserproben entnommen und deren elektrische Leitfähigkeit (entspricht in etwa dem Salzgehalt in mg/l) bestimmt. Im Schnitt betrug diese zwischen 1015 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (April 1992) und 1218 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (August 1993). Der Salzgehalt der einzelnen Wasserproben variierte zwar, das Gesamtbild blieb aber im Charakter gleich. Bei allen Messreihen zeigte sich eine hohe Salzkonzentration im Bereich des Portals auf der Seite St. Gallen, gefolgt von einer kontinuierlichen Abnahme in der Fliessrichtung des Wassers bis zum Portal St. Fiden. Anhand der Messresultate liessen sich zwei unterschiedliche Wassertypen klassifizieren:

A-Typ:

Stark NaCl-haltiges Niederschlagswasser

B-Typ:

Natrium-Hydrogenkarbonat-Tiefengrundwasser

Zur Untersuchung des durch die Fugen des Mauerwerks in den Tunnel eindringenden Wassers (Abb. 3) wurden mit speziellen «Wasserfängern» (System Nagra) Proben entnommen, die an den Feuchtstellen ange-



Abb. 3: Wasserfänger nach dem System «Nagra».

bracht wurden, wo das Wasser nicht direkt aufgefangen werden konnte.

Auswertung und Beurteilung der Wasseranalysen

Mit der Auswertung aller Analysedaten liessen sich die untersuchten Wässer zweifelsfrei einem der Wassertypen A oder B und diese wiederum einem bestimmten Tunnelabschnitt zuordnen.

A-Typ: Stark salzhaltiges Bergwasser mit zum Teil grossen Schwankungen der Gesamtmineralisation. Auch die elektrischen Leitfähigkeiten der Messreihen variierten stark im Bereich zwischen 1200 und 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Der Gehalt an NaCl ist bei diesem Wasser viel höher als beim B-Typ. Alle Proben des A-Typs stammen aus den Moränenabschnitten bzw. Portalbereichen des Tunnels mit geringer Überdeckung.

Die jahreszeitlichen Schwankungen der Gesamtmineralisation stehen ganz offensichtlich im Zusammenhang mit dem Streusalzeinsatz während des Winters.

Angriff von Natriumchlorid auf Stahlbeton.



Abb. 4: Befestigungselement der Geleise im Bereich Portal St. Gallen.



Abb. 5: Gleiskorrosion durch NaCl-haltiges Bergwasser. Die abgebrochenen Stegteile wiegen mehrere 100 Gramm.

B-Typ: Bergwasser mit relativ konstantem Salzgehalt, mittelstark mineralisiert und elektrischen Leitfähigkeiten zwischen 600 und 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Es handelt sich um Natrium-Hydrogenkarbonat-Tiefengrundwasser, das im Mittelbereich des Tunnels, d.h. im Abschnitt mit anstehender Molasse, anfällt. Ein Einfluss durch die Jahreszeiten oder den Streusalzeinsatz lässt sich nicht erkennen.

Beziehung zwischen den Bergwasseruntersuchungen und festgestellten Schäden am bestehenden Bauwerk

Fast alle Wasserproben zeigen ungewöhnlich hohe Gehalte an Natriumchlorid. Natriumchlorid greift Beton nur unwesentlich an. Der Angriff auf die Stahlarmierung ist jedoch gefährlich.

Der Zementstein im Beton reagiert alkalisch, und zwar so lange, wie er durch Luftkohlenensäure nicht karbonatisiert. Über einem pH von 9,5 ist die Stahloberfläche im Beton geschützt. Ein rostiger Armierungsstab erhält im Beton rasch eine blanke Metalloberfläche,

da der Rost mit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ unter Bildung von Kalziumferrithydraten reagiert.

Stahl kann im Beton nur dann rosten, wenn vier Bedingungen erfüllt sind:

1. Am Stahl muss genügend Wasser als Elektrolyt vorhanden sein. Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 bis 60% und mehr ist im Beton ausreichend Wasser kondensiert. Unter 50% rel. Feuchte beträgt die Betonfeuchte dagegen nur ca. 1%.

2. Es muss eine Potentialdifferenz zwischen metallisch verbundenen Elektroden vorhanden sein. Diese Bedingung ist an der Armierungsoberfläche immer erfüllt.

3. An der Anode muss eine ungehinderte Eisenauflösung möglich sein. Der Beton muss karbonatisiert sein (tiefer W/Z-Faktor und dichter Beton verzögern die Karbonatisierung).

4. Es muss ausreichend Sauerstoff an die Kathode gelangen können. Dichter Beton und grosse Betonüberdeckung vermindern den Sauerstoffzutritt.

Stahl korrodiert unter Wasser bei fehlender Sauerstoffzufuhr nur langsam. Das gilt auch für die Armierung im Beton. Bei

schlaffer Bewehrung sind Risse jedoch unvermeidbar, wodurch Sauerstoff leicht an die Armierung gelangen kann. Deshalb sollten die Risse möglichst klein gehalten werden.

Im Innern von Bauwerken	< 0,3 mm
Im Freien	< 0,2 mm
Bei stark korrosionsfördernden Einflüssen	< 0,1 mm

Ein stark korrosionsfördernder Einfluss beginnt, wenn freie Cl-Ionen an die Stahloberfläche gelangen (Bergwasser oder Tausalze). Die Ansammlung von Chloridionen bewirkt, dass ein sog. «Durchbruchpotential» auf der Stahloberfläche erreicht wird und die Chloridionen danach anodisch verstärkt Metall lösen. Die Korrosion führt damit sehr rasch in die Tiefe. In den gebildeten Löchern (Risse sind meist die Ausgangspunkte) sinkt der pH-Wert, und es kann Spannungsrisskorrosion ausgelöst werden. Insbesondere bei Spannstählen genügen Spuren von Chlorid.



Abb. 7: Durch die Wasserverdunstung an der Fugenoberfläche reichern sich die Wasserinhaltsstoffe an und kristallisieren als Salze aus, wobei deren Druckkräfte die Mörtelfestigkeiten weit übersteigen.

Salzsprengung durch Na_2SO_4 , Na_2CO_3 und NaCl

Das Bergwasser des Rosenbergtunnels enthält Karbonate, Sulfate und Chloride der Al-

kalimetalle. Das Bergwasser dringt durch die Fugen der Kalkmauersteine und verdunstet auf der Mauerwerksoberfläche (Tunnelinnenseite). Wo Bergwasser verdunstet, bleiben die Salze in der Lösung zurück und werden



Abb. 6: Unter der schwarzen Deckschicht kommen die stark versalzene Mauerwerksfugen zum Vorschein.

Verbindung	Name	Kristallisationsdruck				
		Mol. Vol.	Übersättigung C/Cs = 2		Übersättigung C/CS = 10	
			0 °C	50 °C	= 0 °C	50 °C
CaSO ₄ · 2 H ₂ O	Gips Kalziumsulfat	55	28,2	33,4	93,8	111,0
Na ₂ SO ₄ · 10 H ₂ O	Glaubersalz Natriumsulfat (Mirabilit)	220	7,2	8,3	23,4	27,7
Na ₂ SO ₄	Glaubersalz Natriumsulfat (Thenardit)	53	29,2	34,5	97,0	115,0
NaCl	Kochsalz Natriumchlorid	28	55,4	65,4	184,5	219,0
Na ₂ CO ₃ · 10 H ₂ O	Natriumkarbonat (Nitrid)	199	7,8	9,2	25,9	30,8
Na ₂ CO ₃ · 7 H ₂ O	Soda Natriumkarbonat	154	10,0	11,9	33,4	36,5
Na ₂ CO ₃ · 1 H ₂ O	Natriumkarbonat (Thermonatrit)	55	28,0	33,3	93,5	110,9

Tab. 3: Im Rosenbergstunnel nachgewiesene Salze im Fugenmörtel.

dort, wenn Bergwasser nachströmt, angereichert bzw. aufkonzentriert.

Dies geschieht beim Rosenbergstunnel primär durch die Fugen zwischen den Kalk- und Betonmauerwerkssteinen und sekundär durch die Betonsteine selbst (in Funktion des k-Werts). Die Kalkmauersteine sind dagegen sehr dicht und werden dementsprechend kaum angegriffen.

Bereich Nische 19–20 (Abb. 6)

Nach dem Entfernen der schwarzen verwitterten Fugendeckschicht erscheint eine 2–3 cm dicke stark versalzene Mörtelschicht. Die Abbildung 6 ist kennzeichnend für den ganzen Bereich.

Zur Kristallisation kommt es, wenn die Lösung für ein bestimmtes Salz im vorhandenen System übersättigt wird. Das Salz kristallisiert, und es kommt zur Salzsprengung, wenn die Salzkristalle gegen die Porenwand drücken. Der dabei entstehende Sprengdruck hängt im Wesentlichen von der Temperatur und der Konzentration der Salzlösung ab, wobei der Druck etwa jenem von gefrierendem Wasser entspricht (der Mechanismus der Frostsprengung verläuft aber grundlegend anders als jener der Salzsprengung). Bei hohen Konzen-

trationen führt der Vorgang unweigerlich zu einer mechanischen Zerstörung des Porengefüges. Die wichtigsten bauschädigenden Salze, die im Rosenbergstunnel nachgewiesen wurden, sind in obenstehender Tabelle angegeben.

Entnahme von Fugenmörtelproben zur Bestimmung der Alkalisalzprofile

Um den Versalzungsgrad sowie die -tiefe bestimmen zu können, wurden 17 Materialproben (aus den Fugen zwischen den Mauersteinen) entnommen und durch das Labor-Prüfinstitut Beinwil am See analysiert. Dabei muss man sich vergegenwärtigen, dass die aneinandergereihte Fugenlänge im Rosenbergstunnel mehr als 100 Kilometer beträgt und die Entnahme von 17 Proben nur qualitative Aussagen erlaubt.

Die Resultate im Überblick:

12 Salzgehaltbestimmungen an Fugenmörtel:
mittlerer Sulfatgehalt über die Fugentiefe 0–70 mm



Abb. 8: Durch Salzsprengung werden die Fugen «zerrieben» und verkleinern sich stetig, bis sie im Extremfall vollständig verschwinden.

min. 0,34 Massen-%

max. 2,34 Massen-%

18 Mauerwerksproben:

Mauerwerkstiefe 0–3 mm:

Sulfatgehalt $\bar{\sigma}$ 1,3 Massen-%

Mauerwerkstiefe 3–10 mm:

Sulfatgehalt $\bar{\sigma}$ 0,114 Massen-%

Trotz der geringeren Oberfläche ist das Salzpotalential in den Fugen rund zwölfmal grösser als jenes der Mauerwerkssteine. Noch deutlicher fällt dieser Unterschied nach der Reinigung der Oberfläche aus. Nach der Oberflächenreinigung (Entfernen der obersten Deckschicht von 0–3 mm) reduziert sich beim Mauerwerk der Sulfatgehalt auf ein für Spritzbeton ungefährliches Mass, während der Salzgehalt in den Fugen praktisch unverändert bleibt. Dies bedeutet, dass eine Reinigung der Oberfläche wohl die Salze der Mauerwerkssteine zu entfernen vermag, nicht aber jene in den Fugen.

Bereich Nische 22–23 (Abb. 8)

Im Bild erkennt man, dass die Fugen infolge Verwitterung bereits einige Zentimeter an Stärke verloren haben. Die Druckfestigkeit des Materials ist aber mit 29,1 N/mm sehr hoch!

Deutlich erkennt man die unterschiedliche Fugenstärke (3–7 cm).

Folgen für die Sanierung des Rosenberg隧nells

Abdichtung des Tunnelmauerwerkes

Für das Sanierungskonzept mussten die folgenden Gefahrenpotentiale beachtet werden:

Bergwasser:

Typ A: Stark NaCl-haltiges Niederschlagswasser, insbesondere in den durchlässigen Moränen der Portalzonen

Typ B: Natrium-Hydrogenkarbonat-Tiefengrundwasser im Molassefels der Mittelzone

Fugenmörtel:

Starke und tiefe Versalzungen mit Na_2Cl , Na_2SO und Na_2CO_3



Abb. 9: Durch die Sprengzyklen (feucht – trocken) der Salzkristalle wird das Betonmauerwerk stark geschädigt. Der Versalzungsgrad des Mauerwerks inklusive der Fugen ist sehr hoch, eine tiefgreifende Reinigung fast unmöglich.



Abb. 10: Aufbringen von KDB auf das Gewölbe, danach folgen die Netze und der Spritzbeton.

Mauerwerk:

Je nach Mauerwerkstyp (Beton, Sandstein) mehr oder weniger starke Versalzung der Oberfläche

Für das geplante Abdichtungskonzept (Gunitzschale von 7 cm Stärke) musste deshalb die Machbarkeit überprüft werden.

Mineralisiertes Bergwasser steht an der Kontaktzone Gunit-Mauerwerk an. Der Wassertransport durch die Gunitzschale wird von der kapillaren Saugfähigkeit des Betons und der Verdunstung auf der Tunnelinnenseite bestimmt. Der jahrelange, stets gleichgerichtete Feuchtigkeitstransport und die anschließende Verdunstung des Wassers führen

zu einer Anreicherung der Salze im Spritzbeton. Die Anreicherung der Salze führt nach Überschreitung bestimmter Konzentrationsgrenzen zur Zerstörung des Betongefüges. Es gelten zurzeit folgende Richtwerte.

- Zerstörung durch NaCl bei 5–6 Massen-% Cl-Ionen, bezogen auf den Gehalt an Bindemittel (Zement)
- Zerstörung durch Na_2SO_4 bei 3,5–4 Massen-% SO_4^- -Ionen, bezogen auf den Gehalt an Bindemitteln (Zement)
- Zerstörung durch Na_2CO_3 bei 0,5–0,6 Massen-% CO_3^- -Ionen, bezogen auf die Gesamtmasse (Beton)

Es spielt eine eher zweitrangige Rolle, welches der drei Alkalisalze die Zerstörung verursacht, denn die Richtwerte der einzelnen Salze bewegen sich in vergleichbaren Größenordnungen. Für jede beliebige Spritzbetonschale kann nun berechnet werden, wie hoch der maximale Salzgehalt in der Schale sein darf, damit die Lebensdauer erreicht wird. Dabei müssen die Kennwerte der Schale wie Wasserleitfähigkeit (SI+A62/1 Prüfung Nr. 5) bekannt sein.

Die Salzanreicherung in der Schale hätte in wenigen Jahren Gehalte erreicht, die beim Wassertyp A die Netzarmerung angegriffen und beim Wassertyp B zu Absprengungen infolge Kristallisation der Mineralsalze geführt hätte. Folgende Lösung kam nach eingehender Evaluation zur Ausführung: Nach der Sanierung der Mauerwerkfugen und der Reinigung der Mauerwerkoberfläche kommt als Sickerschicht eine Drainmatte auf das Mauerwerk zu liegen und darauf eine 2 mm starke Kunststoffdichtungsbahn. Diese wird

mit speziell abgedichteten Kurzankern am Mauerwerk befestigt, an denen die Maschengitter und Armierungsnetze befestigt werden. Das Maschengitter ermöglicht den Auftrag einer ersten dünnen Spritzbetonschicht auf die Kunststoffdichtungsbahn. Für die Netzarmerung war einerseits der Lastfall «Bauzustand» (die Schale reicht vom Widerlagerfuss bis in den Tunnelscheitel und ist dort nicht abgestützt) und andererseits der «Endzustand» (Betoninnenring unter Berücksichtigung von Eisbildung) massgebend.

Dieser aufwendige und teure Aufbau der Tunnelabdichtung kann nur dann in Frage kommen, wenn aggressives Bergwasser ein Risiko für die Beständigkeit einer normalen, direkt auf das Tunnelmauerwerk aufgespritzten Spritzbetonschale bedeutet.

Gleichzeitig kann dadurch die fortschreitende Verwitterung des Mauerwerks (Steine und Fugen) sowie die Korrosion der Geleise gestoppt werden.

Literaturnachweis und -verzeichnis

Untersuchungsbericht Rosenbergtunnel SBB, Institut Bachema AG, Zürich 6.5.1993

Untersuchungsbericht Sanierung des St. Gallen St. Fieden Rosenbergtunnel, Untersuchung Bergwasser Phase 3, Ingenieurgemeinschaft Galli-Heierli, Glattbrugg 1993 - 1995

Untersuchungsbericht A - 13'792-1, LPM AG Baustoffprüfinstitut, Beinwil am See 12.5.1993

Freiluftstollen Fisetenbach – Hintersand der NOK

Der Freiluftstollen Fisetenbach – Ausgleichsbecken Hintersand der Kraftwerke Linth-Limmern AG wurde in den Jahren 1959–62 erbaut. Relativ frühzeitig (1975) traten erste Betonschäden an der Stollenverkleidung auf. Als Verursacher der Schäden wurde aggressives Bergwasser in Betracht gezogen. Die schadhafte Stellen der Betonverkleidung traten aber häufig an «trockenen» Stellen auf, wodurch das Bergwasser als Verursacher in den Hintergrund trat.

Das Begehungsprotokoll vom 22. September 1975 fasste die wichtigsten Resultate wie folgt zusammen:

«Der Stollen ist im Allgemeinen in gutem Zustand. Starke Aussinterungen kommen vereinzelt vor; Felsniederbrüche wurden keine festgestellt. Betonschäden in den nicht voll ausbetonierten Profilen hat man vor allem im ersten Stollenviertel (ca. km 200–1200) vermehrt und im zweiten Viertel (ca. 2330–2900) nur noch vereinzelt feststellen können. Diese vermutlich auf aggressives Bergwasser zurückzuführenden Zerstörungen des Betongefüges an der Oberfläche (bis ca. 3 cm Stärke) haben eindeutig zugenommen.»

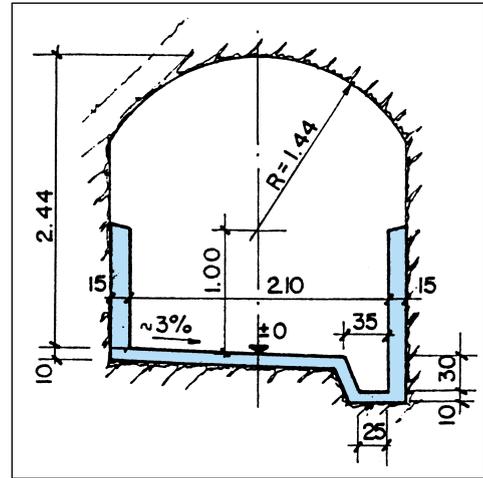


Abb. 1: Eines der 6 verschiedenen Normalprofile der Stollenverkleidung.

Im November 1953 wurde der Stollen ein weiteres Mal untersucht.

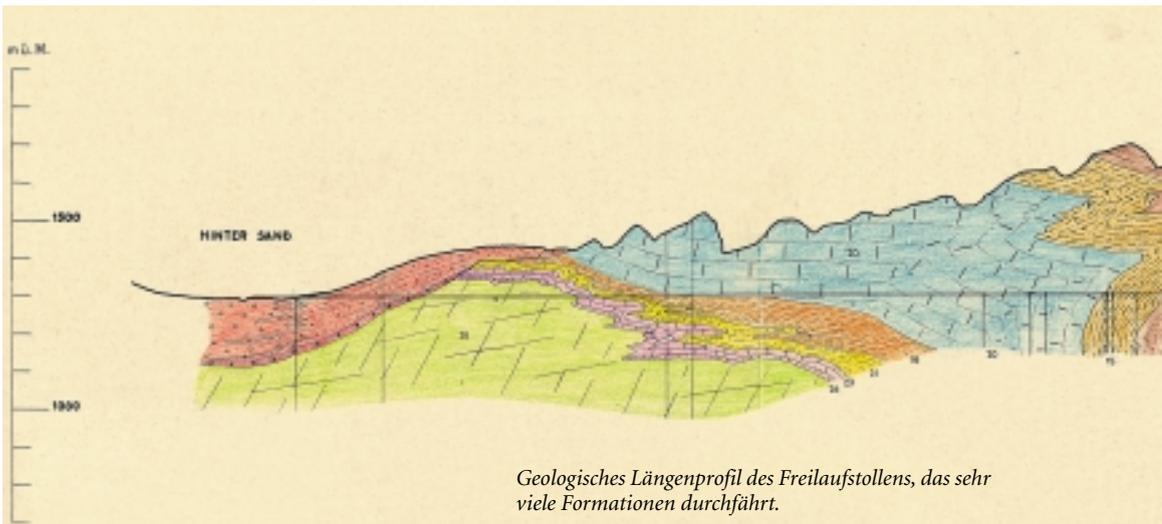
Es konnten dabei 2 verschiedene Korrosionsmechanismen festgestellt werden.

Typ A: Betonkorrosion durch Kalziumsulfat. Während der Begehung wurden Wasserproben entnommen und analysiert. Die ma-

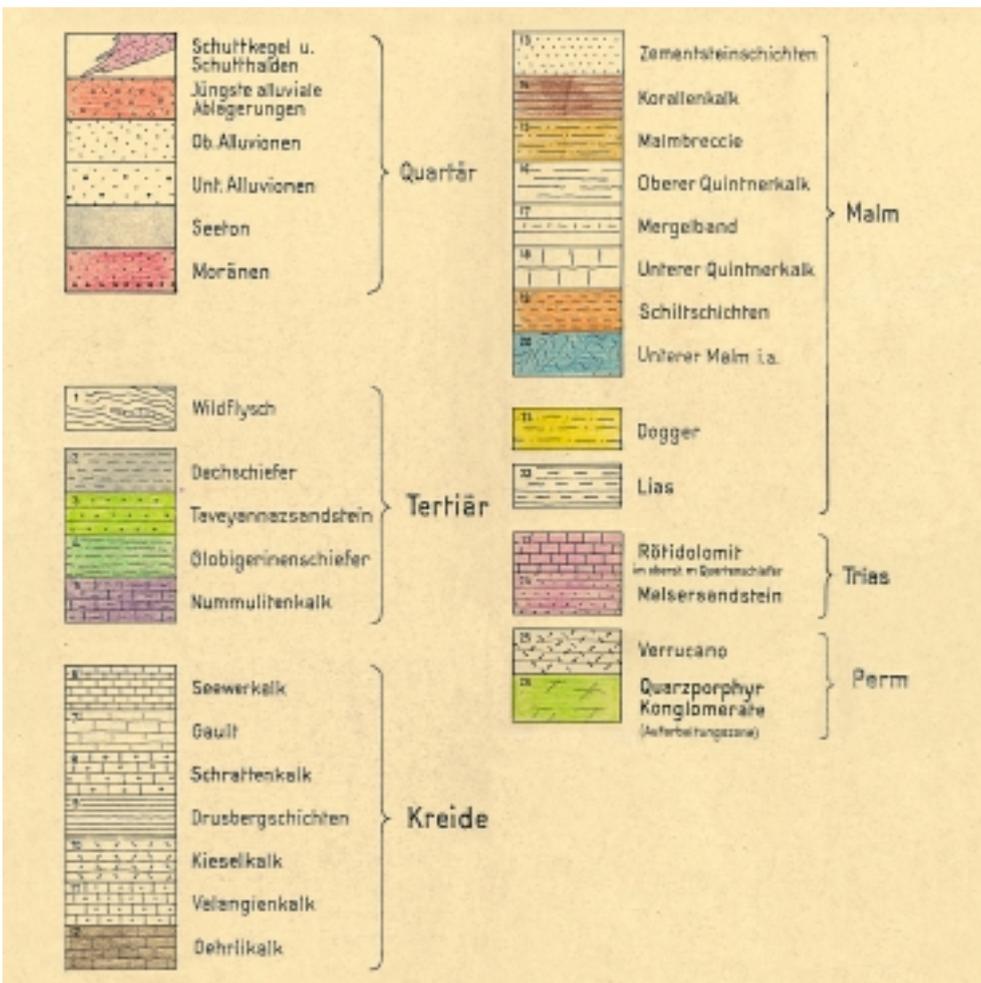


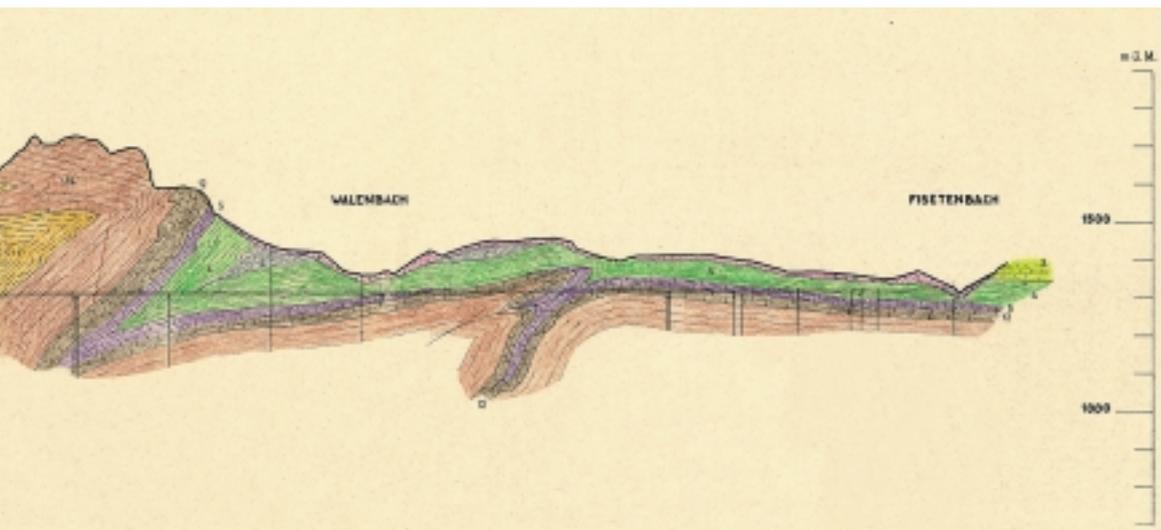
Abb. 2: Beide Aufnahmen vom 2.11.1993 bei km 2,480.





Geologisches Längensprofil des Freilaufstollens, das sehr viele Formationen durchfährt.





ximalen Sulfatgehalte lagen bei ca. 500 mg SO_4/l .

Der Angriff durch Sulfate führt zu einer inneren Zerstörung des Betons durch «Treiben». Das Sulfattreiben wirkt sich zunächst in einer Dehnung des Betons aus. Die Festigkeit steigt bei dieser Dehnung zuerst etwas an, fällt aber dann schnell ab und beträgt bei einer Dehnung von 0,5% nur noch etwa $\frac{1}{2}$ der Ausgangsfestigkeit, weil das Betongefüge durch den Druck der wachsenden Etringitkristalle gesprengt wird. Möglicherweise werden auch Thaumasitkristalle gebildet, die im Prinzip die gleiche Treibwirkung zur Folge haben. Im Freiluftstollen Fisetenbach-Hintersand konnte an zwei Stellen dieser Korrosionsmechanismus festgestellt werden, erste Zone bei Tm 240–270, zweite Zone bei Tm 2330.

Durch das Institut Bachema AG in Zürich wurde im Bergwasser ein Sulfatgehalt von 512 mg SO_4/l bei Tm 247 nachgewiesen. Parallel dazu weist das Rigolenwasser an der gleichen Stelle einen Sulfatgehalt von lediglich 34 mg SO_4/l auf. Woher die Sulfate stammen, lässt sich aus den vorhandenen geologischen Unterlagen nicht schlüssig bestimmen. Das Ausmass der Schäden durch sulfathaltiges Bergwasser kann aber als gering bezeichnet werden und beträgt etwa 5%

gemessen an der Summe der festgestellten Schäden.

Betonkorrosion durch z.B. ungeeignete Zuschlagstoffe

In zwei Stollenbereichen (erster Bereich von Tm 420–760, zweiter Bereich von Tm 2075–2880) treten beidseitig ganz charakteristische Betonschäden vorwiegend auf den Banketten der bis auf halbe Höhe betonierten Wände auf. Die äusseren Betonschichten zerfallen schichtartig bis zu einer Tiefe von 5 cm. Der Zerfall scheint parallel zur Betonoberfläche zu verlaufen (Bruchstücke in der Grösse von mehreren dm^2 lassen sich von Hand herauslösen). Die Betonschäden entstehen ohne sichtbare Zuflüsse von Bergwasser. Oft werden die Schäden durch eine intakte Oberflächenschicht verdeckt und erst bei mechanischer Beanspruchung (klopfen mit Hammer) sichtbar. Die Schadentiefe variiert von 2 bis 5 cm. Die Betonzerstörung beschränkt sich nicht allein auf den Zementstein, sondern erfasst auch die Zuschlagstoffe (insbesondere die dunklen Kalkschiefer). Die Schäden treten (im Betriebszustand) ausschliesslich oberhalb der Wasserlinie des Freiluftstollens auf. Die Schäden entstehen



Abb. 3: Aufnahme vom 2.11.93 bei Tm 2788,50.



Abb. 4: Aufnahme vom 2.11.1993 bei Tm 420.



Abb. 5: Aufnahme vom 2.11.1993 bei Tm 2617.



Abb. 6: Aufnahme vom 2.11.1993 bei Tm 2075.

ohne mechanische Beanspruchung durch das umgebende Gebirge (keine sichtbaren Verformungen der Betonverkleidung erkennbar) und zeigen keine Korrelation mit bestimmten Gesteinsformationen des anstehenden Gebirges.

Diese zum Teil verdecken Schäden treten auch beim vollbetonierten Normalprofil S 13 auf, vorzugsweise beim Normalprofilwechsel an den Stirnseiten, da hier die Luftzirkulation und damit die zugeführte Feuchtigkeit besonders hoch sind.

Interessanterweise treten die Schäden häufig im unteren Teil des Stollens auf, wo die Luftfeuchtigkeit, als Folge des langen Fliessweges, sehr hoch ist.

Die analoge Schadensverteilung kann bei den Fertigelementen des Tunnels Quartan beobachtet werden. Zudem kann bei beiden Bauwerken eine deutliche gelb-bräunliche Verfärbung des Zementsteins im Bereich der Schäden festgestellt werden. Die Zuschlagstoffe, die für die Stollenverkleidung verwendet wurden, stammen einerseits aus einem nahegelegenen Steinbruch und andererseits

wurde auch anfallendes Ausbruchmaterial verwendet.

Bei anderen Bauwerken hat man mit den gleichen Zuschlagstoffen ebenfalls negative Erfahrungen gemacht (Stützmauern Klauenpass-Strasse).

Die Zuschlagstoffe sind kubisch-plattig und zum Teil kantengerundet. Verwendet wurden Kalke, Gneise, Schiefer, Quarz, Feldspat, Sandsteine und Kalzit. Die Zuschlagstoffe sind meist verwittert, porös und weisen einen hohen Anteil Bruchmaterial auf.

Trotz umfangreichen Abklärungen und Untersuchungen verschiedener Baustofflabors konnte die Schadensursache nicht abschliessend identifiziert werden. Es scheint sich aber mit grosser Wahrscheinlichkeit um eine Reaktion der verwendeten Zuschlagstoffe mit dem zementgebundenen Bindemittel zu handeln. Dabei könnte es sich um eine spezielle Form der Alkali-Aggregat-Reaktion oder sog. Alkali-Karbonat-Reaktion handeln. Zusätzliche Abklärungen könnten beispielsweise durch die Empa, Abt. Biontechnologie, erfolgen.

Literaturnachweis und -verzeichnis

Freilaufstollen Fiseten – Ausgleichsbecken Hinter Sand, Untersuchung der Betonschäden, Technischer Bericht, Wegmüller-Galli-Rüttimann Beratende Ingenieure, Glattbrugg März 1994
Untersuchungsbericht A - 14'575-1, LPM AG Baustoffprüfstitut, Beinwil am See 20.12.1993

Kraftwerk Hinterrhein AG Thusis

Freispiegelstollen Valterschiel – Fundogn – Bärenburg

Der Stollen befindet sich zwischen dem Stausee Sufers und Thusis auf 1415 m ü.M. und hat eine Länge von 5250 m bei einem U-förmigen Stollenquerschnitt von ca. 4 m². Er wurde in den Jahren 1960–62 erstellt.

Es werden sowohl harte Gneise und Quarzite als auch weiche Tonschiefer und Rauhwacken durchfahren. Zwei Drittel der Stollenlänge sind mit Gunit verkleidet. Der Rest des Stollens wurde mit einem Innenring versehen.

Im Jahre 1988 wurden umfangreiche Sanierungsarbeiten durchgeführt. Die Arbeiten

verteilen sich auf sehr viele kleine lokale Schadstellen. Das Schwergewicht der Arbeiten lag dabei bei der Behebung von Abplatzungen. Zudem wurde an vielen Stellen ein wesentlicher Auftrag von Gunit notwendig (auf eine Gesamtlänge von 110 m), die Sohle an diversen Stellen erneuert (ca. 35 m) oder die Rigole ersetzt (ca. 210 m).

Die Wasseranalysen zeigen unterschiedliche Charaktere und Mineralisationsgrade des Bergwassers. Die Wasserproben wurden mit Tunnelmeterangaben versehen (Tm 0: Stollenanfang beim Fundogntobel; Tm 5222: Bärenburg).

Die Wasserproben zeigen an mehreren Stellen hohe Sulfatwerte (> 1500 mg SO₄/l).

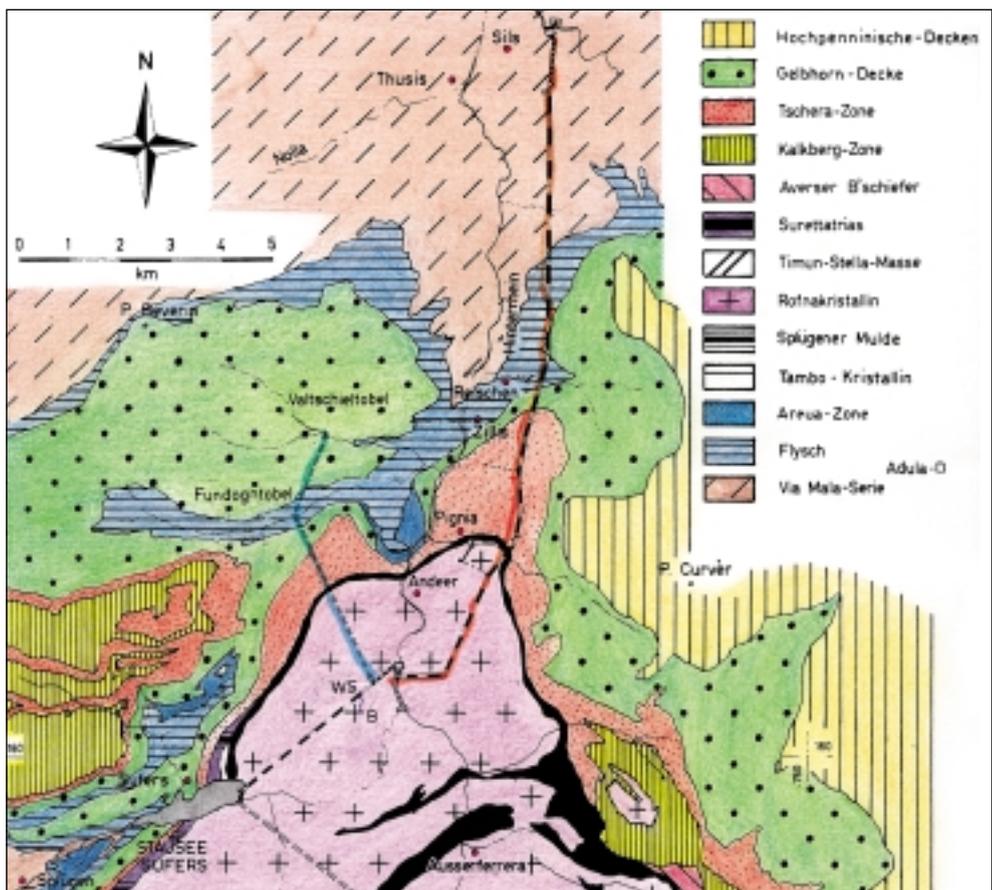


Abb. 1: Geologischer Übersichtsplan 1 : 100'000.

Bachema-Probe Nr.			Tm 50 937936	Tm 195 937937	Tm 210 937938	Tm 230 937939	Tm 3000 937940
Temperatur des Wassers			°C				
Sinnesprüfung	Aussehen:	qualitativ	Bodensatz	Schwebstoffe	klar	klar	Schwebstoffe
	Farbe :	qualitativ	farblos	farblos	farblos	farblos	farblos
	Geruch :	qualitativ	geruchlos	modrig	modrig	geruchlos	geruchlos
el. Leitfähigkeit	bei 20 °C	µS/cm	2190	818	1597	2070	1213
pH-Wert			7,46	7,71	7,68	7,42	7,77
Säurekapazität	bis pH 4,3	mmol/l	2,62	2,84	2,94	2,70	2,24
Karbonathärte		°fH	12,85	13,95	14,45	13,25	10,95
Kalzium	Ca	mg/l	578	150	369	541	296
Magnesium	Mg	mg/l	62	35	58	59	23
Chlorid	Cl	mg/l	4,0	0,7	1,6	3,5	-0,5
Sulfat	SO ₄	mg/l	1845	395	1110	1590	730
freie Kohlensäure (ber.)	CO ₂	mg/l	7,66	5,07	5,33	3,34	8,64
aggressive Kohlensäure	CO ₂	mg/l	-19,87	-8,98	-21,35	-10,86	-19,87

Tab. 1: Wasserproben aus verschiedenen Entnahmeorten.

Kalkaggressive Kohlensäure konnte keine nachgewiesen werden, obwohl sie bei den schadhafte Stellen deutliche Spuren hinterlassen hat. Das Bergwasser neigt zur Ablagerungsbildung. Ansonsten sind keine korrosiven Wasserinhaltsstoffe festgestellt worden. Der Angriff auf die Verkleidung erfolgt also ausschliesslich durch Sulfate und aggressive Kohlensäure. Hier ein paar Aufnahmen (S. 97/98).

Untersuchungen von Betonproben durch das Prüflabor LPM zeigten deutlich den Ein-

fluss der Sulfate auf den Zementstein. Eine Probe mit einem Sulfatgehalt von 3,6 Massen-% (bezogen auf den Bindemittelgehalt, d.h. den Zement) wies eine starke Zementsteinauflösung sowie Sulfat- und Kalzitausfällungen auf. Die Betonfestigkeit der Stol-

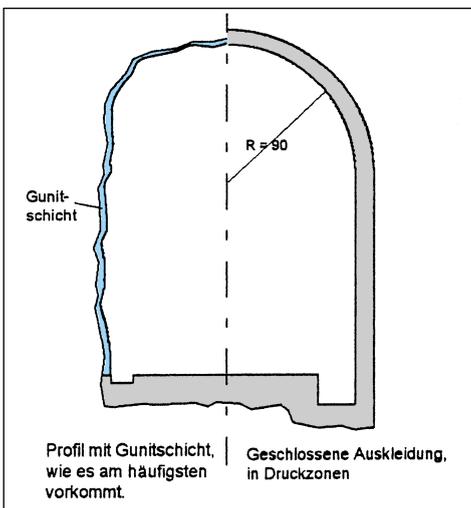


Abb. 2: Stollenquerschnitt.



Abb. 3: Quellaustritt in den Stollen. Die roten Ablagerungen zeigen die Anwesenheit von CO₂-haltigen Wässern an, denn nur diese vermögen Eisen im Untergrund zu lösen.



Abb. 4: Grossflächige Gunitabplatzungen im Gewölbe. Darunter Betonzersetzungsprodukte (Gips, Thaumasit...).

lenverkleidung an diesen Stellen ist weitgehend verlorengegangen.

Der Korrosionsverlauf kann vereinfacht wie folgt beschrieben werden:

A) Das anstehende Bergwasser wird über Abschlauungen direkt in die Rigole geleitet oder es wird unter Druck durch die Betonverkleidung gepresst.

B) Durch den Wasserunterdruck entstehen Risse in der Betonverkleidung. Durch die Risse kann das Bergwasser in das Stolleninnere gelangen. Da das Bergwasser in seiner ursprünglichen Form sehr viel gelöstes CO_2 enthält, hat es auf seinem Fliessweg viel Kalk

lösen können. Dieser Kalk wird nun, infolge der Druckentlastung und der Möglichkeit zur Entgasung, in den Rissen abgelagert. Die Risse verschliessen sich, und der Wasserdruck steigt an. \Rightarrow Damit beginnt der Prozess wieder bei A).

C) Durch den Bergwasserdruck werden die Wasserinhaltsstoffe in und schliesslich durch die Betonverkleidung gepresst. Auf ihrem Weg gehen sie Interaktionen (Reaktionen) mit den Zuschlagstoffen und dem Zementstein ein und bilden dabei neue Verbindungen. Durch den steten Nachschub von Bergwasser kommt die Reaktion langsam



Abb. 5: Stark angerostete Ankerplatten (25 x 25 cm) durch mineralisiertes 1–2 g/l, CO_2 -haltiges Bergwasser.



Abb. 6: Die Sohle ist gebrochen. Im Riss sichtbar sind die Betonersatzprodukte.



Abb. 7: Korrosion des Betoninnenrings durch Bergwasser, das unter Druck durch die Schale gepresst wird.

zum Erliegen. Die Salze sind nun in der Überzahl und konzentrieren sich auf. Da der Wassernachschub nicht abnimmt, wird die Löslichkeit mit den einzelnen Salzen überschritten und sie lagern sich ab. Wo diese Auskristallisationen stattfinden, ist sehr schwierig vorherzusagen, aber grundsätzlich gibt es dafür 3 Möglichkeiten:

- Kristallisation an der Kontaktfläche Fels-Betonverkleidung (sehr oft der Fall bei Gips, Ettringit, Thumasit und anderen Zersetzungsprodukten des Betons).

- Kristallisation innerhalb der Betonverkleidung (sehr oft der Fall bei Chloriden und Gips, der sich aus den Zementbestandteilen bildet).

- Kristallisation auf der Innenseite der Betonverkleidung (sehr oft der Fall bei Natriumverbindungen).

D) Lokale Schadenstellen der Betonverkleidung werden durch die anhaltende Korrosion geschwächt und brechen unter dem Bergwasserdruck ins Stolleninnere.

Die Schadenstellen sind meist sehr eng begrenzt, da auch die Zuflüsse des Bergwassers nur auf lokal diskreten Bahnen stattfinden und nur selten grossflächigen Druck ausüben. Dadurch erklärt sich die Tatsache, dass in vielen Fällen 95% der Stollenverkleidung

vollkommen intakt sind und nur 5% durch den Wasserangriff zerstört wurden.

Die Druckzunahme an Bergwasser in gesundem Fels wird oft massiv unterschätzt, denn sie kann innerhalb von wenigen Metern bis zu hundert Bar erreichen (Sondierstollen Pioramulde, Wasserabpressversuche).

Literarnachweis und -verzeichnis

- Untersuchungsbericht A – 14'574-1, LPM AG Baustoffprüfstitut, Beinwil am See 10.1.1994
 Zuleitung Valtschiel- und Fundognbach Geologische Stollenaufnahmen, Dr.sc.nat. ETH Heinrich Jäcklin, Zürich 28.2.1963
 Untersuchungsbericht, Chemisches Laboratorium u. Lebensmittelinspektorat des Kt. Graubünden, Chur 30.10.1987

Untersuchungen am Überleitstollen von Zervreila nach Wanna

Der Überleitstollen Zervreila–Peil der KW Zervreila AG bildet den ersten Teil der unterirdischen Wasserzuführung Zervreila–Wanna auf 1750 m ü.M. und liegt ca. 25 km südwestlich von Thusis. Auf halber Strecke überquert der Stollen das Peilertal bei der Zwischenfassung des Peilerbaches in einer Rohrbrücke. Der nachfolgende, zweite Stollen führt von dieser Rohrbrücke zum Ausgleichsbecken Wanna. Erstellt wurde diese Verbindung 1957.

Der erste Teil der Anlage, der Stollen Zervreila–Wanna, wird normalerweise als Freispiegelstollen betrieben, mit Ausnahme der Sommermonate, hier wechselt die Fliessrichtung und der Stollen wird zum Druckstollen. Die maximale Überdeckung beträgt 650 m, es werden dabei Schichten der Trias, Amphibolite und Gneise durchfahren.

Hydrologie

Zur Bestimmung der im Bergwasser gelösten Mineralsalze misst man die elektrische Leitfähigkeit des Wassers. Der dabei gemessene Wert in $\mu\text{S}/\text{cm}$ (1 Siemens = $10^6 \mu\text{S}$) entspricht in etwa der Summe der gelösten Wasserinhaltsstoffe in mg/l.

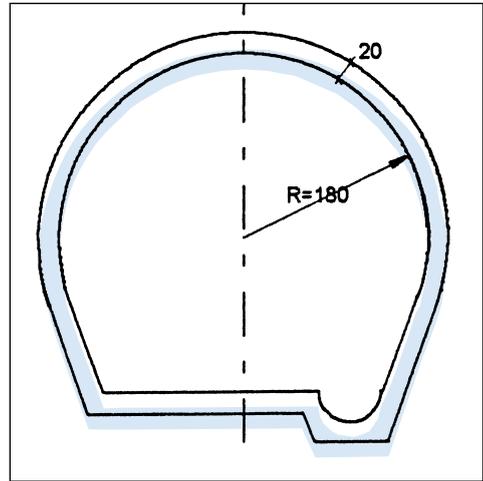


Abb. 1: Hufeisenförmiges Profil mit ca. 10 m² QS-Fläche.

Die Wasserproben im Bereich des Portals Zervreila (Tunnelmeter 0–600) zeigen relativ tiefe Werte (213–441 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Die Vermutung, dass es sich dabei um schwach mineralisiertes Schmelzwasser handelt, stimmt nur bedingt, da der Salzgehalt für unbeeinflusstes Schmelzwasser doch noch deutlich tiefer liegt.

Mit zunehmender Stollentiefe und paralleler Zunahme der Überlagerungshöhe

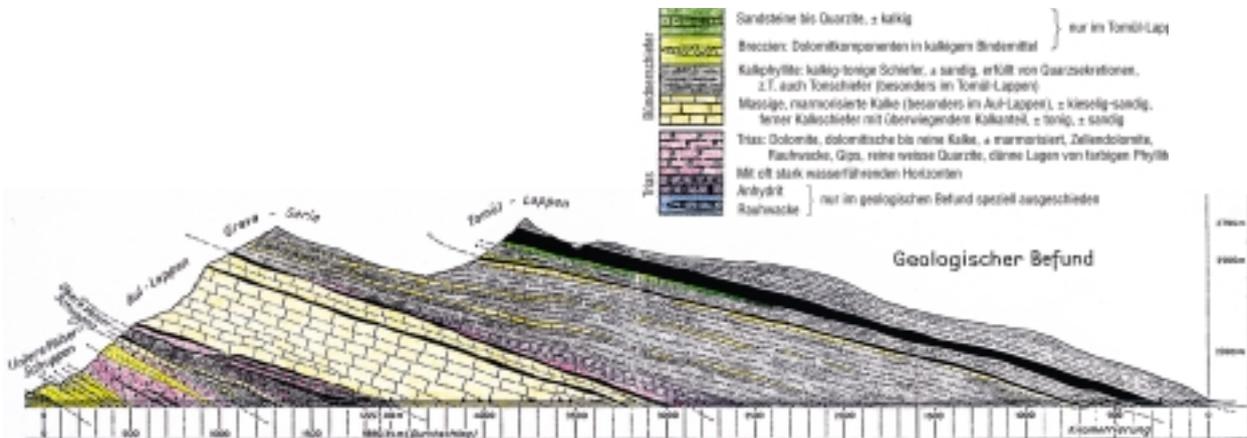


Abb. 2: Längensprofil des Stollens Wanna–Peil.

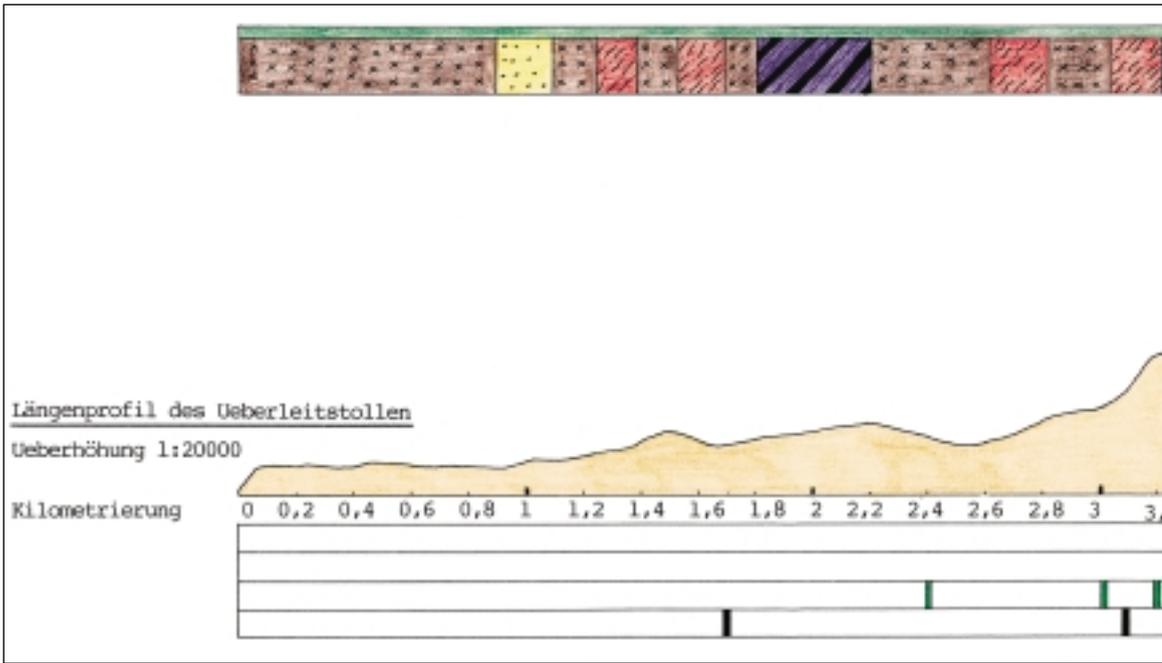


Abb. 3: Längenprofil des Stollens Zervreila–Wanna mit Geologie und schadhafte Stellen.

steigt auch der Salzgehalt in den Bergwasserproben kontinuierlich an und erreicht bei Tm 3750 mit einer elektr. Leitfähigkeit von 1750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ den höchsten Wert in diesem Stollen.

Parallel dazu steigt auch der Salzgehalt des Bergwassers in der Tunnelrigole. Dabei muss man beachten, dass eine Wasserprobe aus der Tunnelrigole stets eine Mischung aller Bergwasserzuflüsse (bis zur Entnahmestelle) darstellt.

Vergleicht man die gemessenen elektr. Leitfähigkeiten der Wasserproben mit den zugehörigen geologischen Formationen (an der Entnahmestelle), so lässt sich kein signifikanter Zusammenhang feststellen. Das bedeutet, dass die im Bergwasser gelösten Mineralstoffe nur zum Teil aus dem anstehenden Gestein stammen und dass beim Durchströmen von tiefliegenden Formationen eine zusätzliche Mineralisation stattfindet.

Vergleicht man dagegen die Werte der elektr. Leitfähigkeiten mit den Standorten der Betonsanierungen, so lässt sich eindeutig ein Zusammenhang feststellen.

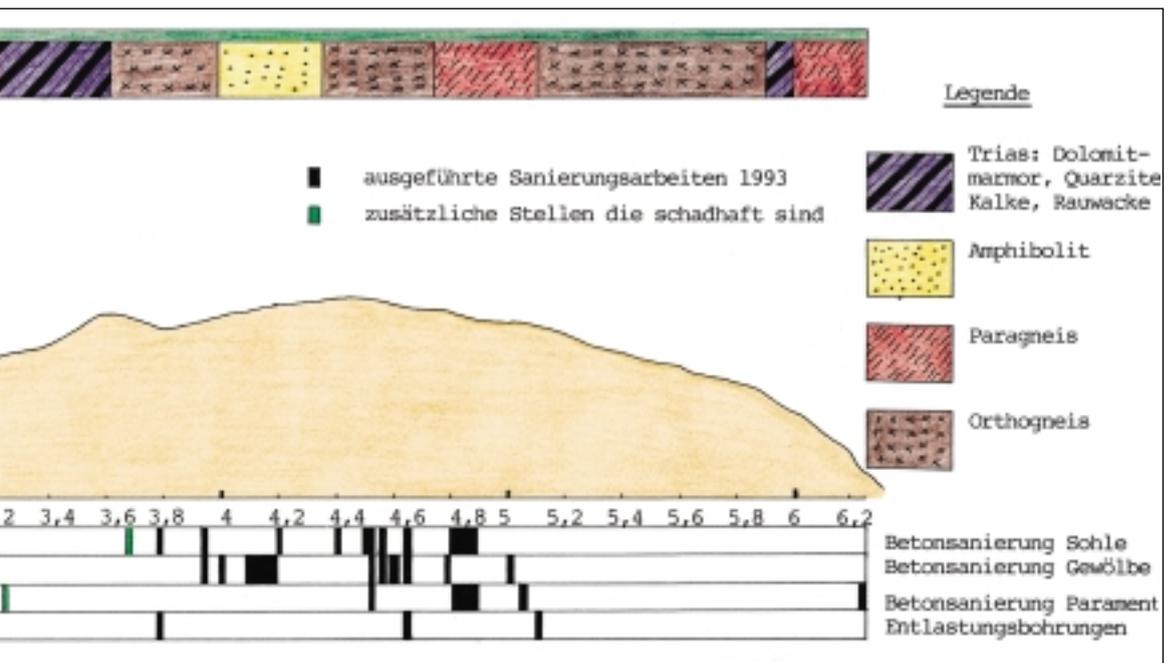
Die schadhafte Stellen liegen schwerpunktmässig im Bereich Tm 3600–5000. Parallel dazu liegen die höchsten Salzgehalte ebenfalls in dieser Zone.

Auch im Stollen Wanna–Peil wurden wiederum sehr viele Wasserproben aus Feuchtstellen im Gewölbe sowie aus der durchgehenden Rigole entnommen. Zur Bestimmung des Salzgehaltes wurde jeweils die elektr. Leitfähigkeit der Wasserproben bestimmt.

Zu Beginn stösst man wiederum auf schwach mineralisiertes Sickerwasser. Danach steigt der Salzgehalt der Wasserproben aus den Tropfstellen im Gewölbe rasch an bis zum lokalen Maximalwert von 1041 $\mu\text{S}/\text{cm}$ bei Tm 7500 und fällt im Anschluss daran kontinuierlich bis auf 313 $\mu\text{S}/\text{cm}$ bei Tm 9750.

Erst bei Tm 10'600 bis 10'800 wird mit 1850 $\mu\text{S}/\text{cm}$ das Maximum erreicht, wobei hier der Zufluss von Bergwasser nicht allzu gross sein kann, da der Salzgehalt des Rigolenwassers nahezu konstant bleibt.

Bei der Betrachtung der Messwerte der elektr. Leitfähigkeiten und der anstehenden



geologischen Formationen ist eine teilweise Übereinstimmung zu erkennen. Die Formationen der Trias (Dolomite, Rauhwacke) liefern zum überwiegenden Teil stark mineralisiertes Bergwasser.

Bei den übrigen Formationen ist eine ein-

deutige Zuordnung der Formation zu einem bestimmten Salzgehalt des dort entspringenden Bergwassers nicht möglich.

Die Lage der schadhaften Stellen verteilt sich regelmässig über die ganze Stollenlänge. Einzig im Bereich des Übergangs vom Bündnerschiefer zur Trias häufen sich insbesondere die Betonsanierungen an der Sohle. Dies deutet auf eine Schädigung der Sohlenplatte durch quellende Gesteinsformationen in Verbindung mit sehr aggressivem Bergwasser hin. Die Tunnelbereiche, in denen der Salzgehalt des Bergwassers hoch ist (elektr. Leitfähigkeit $> 800 \mu\text{S}/\text{cm}$), müssen ohne Ausnahme stellenweise saniert werden.

Chemische Analyse ausgewählter Proben, Interpretation der Resultate

Im Anschluss an die Portalzone des Stollens Zervreila-Peil fielen uns bei Tm 250–500 Wasserzutritte auf, die ganz offensichtlich grössere Mengen Gas mitführten. Auf dem nebenstehenden Foto sind diese Wasserzutritte abgebildet.



Abb. 4: Obige Aufnahme aus dem Stollen Zervreila-Peil zeigt CO_2 -haltiges Bergwasser, welches beim Eintritt in den Stollen entgast.

Tunnelmeter (Tm)	Stollen Zervreila–Peil 3250	Stollen Zervreila–Peil 3750	Stollen Peil–Wanna 7900	Stollen Peil–Wanna 10'600
Magnesium mg/l	21	25	38	32
Sulfat mg/l	730	1173	568	1190
el. Leitfähigkeit µS/cm bei 20 °C	1284	1750	1041	1792

Tab. 1: Sulfatgehalte und Gesamtmineralisation einiger weniger Wasserproben.

Die Überprüfung des Bergwassers vor Ort mittels eines pH-Messstreifens ergab, dass das Bergwasser sauer reagierte (mit einem pH-Wert zwischen 4–4,5). Die Vermutung, dass es sich dabei um kohlen-saures Wasser handelt, sollte durch eine chemische Analyse bestätigt werden. Leider wurde durch den Transport nach Zürich das CO₂ ausgetrieben, sodass die nachfolgende Analyse im Labor des Instituts Bachema negativ ausfiel.

Neben diesen beiden wurden vier weitere Wasserproben auf ihren Sulfat- und Magnesiumgehalt analysiert. Die Tabelle (oben) enthält die ermittelten Werte.

Die Sulfatgehalte erreichen demnach in beiden Stollen Werte > 1000 mg/l. Die Magnesiumgehalte variieren, unabhängig vom Sulfatgehalt, in einer Bandbreite von 21 bis 38 mg/l. Die gemessenen elektr. Leitfähigkeiten verhalten sich proportional zu den ermittelten Sulfatgehalten.

Interpretation der Resultate

In den beiden Überleitstollen von Zervreila nach Peil infiltrieren verschiedene Bergwassertypen.

- *Typ A:* schwach mineralisiertes Niederschlags- und Schmelzwasser
- *Typ B:* Im Stollen Zervreila–Peil tritt Bergwasser ein, das erhebliche Mengen überschüssiger Kohlensäure aufweist.

Das Vorkommen von Säuerlingen im nördlichen Bündnerschiefer-Gebiet zwischen Valsertal und Prättigau ist bekannt. Das Kohlendioxid entsteht durch thermometamorphe Prozesse in grossen Tiefen, steigt auf und löst sich in den durch die Versicke-

rung von Niederschlägen gespeisten Wässern.

In Peiden stösst man auf Säuerlinge, wo an der Hauptüberschiebung der penninischen Decken deren Bündnerschiefer auf den ultrahelvetischen Sedimentmantel des Gott-hardmassivs aufgeschoben sind.

Einen südlichen Ausläufer der sich südlich des Rheintals zwischen Valsertal und Prättigau erstreckenden Zone von Kohlendioxidwässern markieren die Säuerlinge von San Bernardino. Trias führende penninische Sedimente sind hier über dem das Wasser stauenden Kristallin verschuppt.

Der Stollen von Zervreila ins Peilertal liegt in einer geologisch sehr ähnlichen Situation. Das Bergwasser enthält Kohlendioxid und wird je nach Fliessweg durch die Triasschichten zusätzlich mit Gips angereichert. Dies erklärt, weshalb wir in den Portalbereichen primär kohlen-saures Bergwasser mit wenig Sulfaten antreffen, im Berginnern aber der Anteil an Sulfaten zusätzlich ansteigt.

Bauwerksschäden

Sulfatangriff auf Beton

Durch die Einwirkung von wasserlöslichen Sulfaten wird ein sogenannter treibender Angriff (Sulfattreiben) hervorgerufen. Sulfathaltige Lösungen haben ein hohes Benetzungsvermögen und dringen daher relativ schnell und tief in den Beton ein. Enthält der Beton vom Zement her Trikalziumaluminat (C₃A) bzw. dessen Hydratationsprodukte, so kann das angreifende Sulfat mit diesen reagieren. Dabei bildet sich Ettringit. In der Praxis hat es sich aber gezeigt, dass Ettringit-schäden viel seltener anzutreffen sind als

Thaumasitschäden. Die Ursache dafür ist noch unbekannt. Damit es zur Bildung von Thaumasit kommt, scheint es notwendig zu sein, dass der Beton vorgängig seine Alkalität verliert. Dies ist in Gebieten mit CO_2 -Wässern natürlich immer möglich.

Sulfatschäden sind im Allgemeinen oberhalb des Wasserspiegels stärker als unterhalb.

Durch Verdunstung oder durch die durch Bergwasserdruck verursachte Durchströmung des Bauteils können sich die Sulfate anreichern und eine besonders starke Treibwirkung entfalten. Der treibende Sulfatangriff beschränkt sich nicht immer auf den Zementstein, sondern kann sich in Sonderfällen auch auf den Zuschlag erstrecken. Bei

Fotos aus dem Stollen Zervreila–Peil–Wanna



Abb. 5: Stollen Zervreila–Peil, Tm 3100. Längsriß in der Tunnelsohle an der Kontaktstelle zur Rigole. Die Zersetzungsprodukte im Riß bestehen aus Gips, Zuschlagstoffen und PC-Klinkerresten.



Abb. 6: Stollen Zervreila–Peil, Tm 4600. Etwa ein 2×2 m grosser Defekt im Gewölbe. Es sind starke Gipsanlagerungen an der Kontaktzone zum Fels sichtbar. Die Zerstörung des Betons erfolgte durch stark sulfathaltiges Bergwasser (ca. $1000 \text{ mg SO}_4/\text{l}$), das unter hohem Druck durch das Betongewölbe sickert. Die Zersetzungsprodukte zeigen eine Thaumasit-Ettringit-Struktur. Es ist anzunehmen, dass die Nachbarpartien auch von diesem Betonangriff betroffen sind und in Zukunft weitere Sanierungsarbeiten anstehen.



Abb. 7: Die obere Aufnahme zeigt einen Längsriss im Stollen Zervreila–Peil bei Tm 2400. Die weißen Ausscheidungen an dieser Stelle bestehen nicht nur aus Kalziumkarbonat, sondern zeigen Anteile von zersetzten Betonpartien. Dies erkennt man an den feinen Sandkörnern, die in den Versinterungen enthalten sind. Der Beton ist an dieser Stelle massiv geschädigt, und lediglich die oberste Deckschicht ist intakt geblieben.



Abb. 8: Zersetzungsprodukte aus den schadhaften Stellen im Stollen.



Abb. 9: Aufnahme des Peilertals.

glimmerhaltigem Zuschlag kann zwischen den Glimmerplättchen eindringende Sulfatlösung zur Kristallisation von Gips und zum Auftreiben führen. Besonders anfällig sind angewitterte Glimmerschiefer. Diese Probleme erkannte man frühzeitig im Gebiet des Nordwestschweizer Juras, wo sulfathaltiges Bergwasser häufig vorkommt.

Bei der Sanierung bestehender Bauwerke versuchte man, mittels der Verwendung von sogenannten «sulfatbeständigen Zementen» mit kleinem C_3A -Gehalt den betreffenden Angriff abzuwehren. Es zeigte sich aber in der Folge, dass auch diese Zementarten diesem Angriff nicht lange zu widerstehen vermögen und die gleichen Schadensbilder nach einiger Zeit wieder auftauchen.

Das Labor Prüfinstitut Beinwil am See hat sechs verschiedene Materialproben aus den beiden Überleitstollen mikroskopisch mittels Dünnschliffanalyse auf die verant-

wortlichen Korrosionsmechanismen untersucht. Demzufolge bestätigte sich die Vermutung, dass die Betonschäden der beiden Überleitstollen primär durch den Angriff von gipshaltigem Bergwasser verursacht wurden.

Literaturnachweis und -verzeichnis

- Schlussbericht Sanierung Überleitstollen Zervreila-Wanna, Ingenieurbüro Kälin, Meilen 28.7.1993
- Untersuchungsbericht Resultate der chemischen Untersuchung von Wasserproben, Institut Bachema AG, Zürich 3./4. 5.1993
- Untersuchungsbericht über die Einflüsse des Bergwassers auf die Überleitstollen von Zervreila nach Wanna, Ingenieurbüro Wegmüller, Riehen

Literaturnachweis und -verzeichnis Bauwerksuntersuchungen

- Biczók I. (1968): Betonkorrosion Betonschutz; Wiesbaden, Berlin (Bauverlag GmbH).
- Cather S. (1987): The Conservation of Wall Paintings; London (The Getty Conservation Institute).
- Gerdes A. und Wittmann F.H. (1997): Wechselwirkung zementgebundener Werkstoffe mit natürlichen Wässern und industriellen Abwässern; ETH Zürich, Aarau (VBK-Fachtagung).
- Gerdes A. und Wittmann F.H. (1994): Beton im Bereich landwirtschaftlich genutzter Flächen - Aspekte der Dauerhaftigkeit; Bericht 10/94, Institut für Baustoffe ETH Zürich.
- González M.A. and Irassar E.F.(1997): Ettringite Formation in low C3A Portland Cement exposed to Sodium Sulfate Solution; Olavaria, Argentina (Elsevier Science Ltd).
- Koelliker E. (1990): Die Carbonatisierung von Stahlbeton - ein Überblick (Sonderdruck aus: Beton- und Stahlbeton; Berlin (Verlag Wilhelm Ernst & Sohn).
- Kollmann H. (1978): Mineralogische Untersuchungen über Ausblühungs- und Treiberscheinungen an Baustoffen durch Sulfate; Giessener geologische Schriften; Giessen (Lenz Verlag).
- Kollmann H. und Strübel G.(1979): Untersuchungen über Ausblühungs- und Treiberscheinungen, Teil 1-3; Giessen (Betonwerk + Fertigteil-Technik, Heft 10-12/1979).
- Krenkler K. (1980): Chemie des Bauwesens, Band 1 Anorganische Chemie; Berlin, Heidelberg (Springer Verlag).
- Kutzner Ch. (1991): Injektionen im Baugrund; Stuttgart (Ferdinand Enke Verlag).
- Peter G., Yang Q. und Arnold B. (1986): Die Beständigkeit von Beton im Bereich Wasser Abwasser; Zürich (Schweizerische Monatszeitschrift für Gasversorgung und Siedlungswasserwirtschaft No. 7).
- TFB Wildegg (1993): Cementbulletin, Beton in Kläranlagen; Stäfa (Zürichsee Druckereien AG).
- Wittmann F.H. (1992): Feuchtigkeitstransport und Dauerhaftigkeit von Beton, WTA-Schriftenreihe Heft 3; Baierbaum (WTA).

Versinterungsbildung – Versinterungsverhinderung

Das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht

Bei der Entwässerung von Untertagebauwerken fallen Wässer an, die einen hohen Gehalt an gelösten Wasserinhaltsstoffen aufweisen. Diese vorwiegend anorganischen Wasserinhaltsstoffe verursachen oft harte Ablagerungen. In der Schweiz spricht man von Versinterungen und meint damit primär die Ausfällung von Kalziumkarbonat (Kalk) aus einer wässrigen Lösung. In benachbarten Ländern wie Deutschland oder Holland kommen auch andere Ausfällungstypen wie beispielsweise die Verockerungen (Eisenausfällungen) vor, die aber bei uns eine untergeordnete Rolle spielen.

Den Mechanismus von Kalkausscheidungen in Drainageleitungen kann man erfassen und verstehen, wenn man die zentrale Rolle des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts in die Betrachtung einbezieht.

Kohlendioxid CO_2 löst sich in Wasser in beträchtlicher Menge unter Bildung von Kohlensäure H_2CO_3 . Nur ca. 0,1% der im Wasser gelösten CO_2 -Moleküle machen diese Reaktion mit. Die Löslichkeit des CO_2 in Wasser ist druck- und temperaturabhängig. Bei Normaltemperatur (15 °C) nimmt 1 Liter Wasser ca. 1 l CO_2 -Gas auf. Bei Druckerhöhung steigt die Löslichkeit etwa in gleichem Mass, wie der Druck ansteigt. Bei Temperaturerhöhung nimmt die Löslichkeit um etwa einen Drittel je 10 °C Temperaturanstieg ab.

Es gibt grundsätzlich zwei Möglichkeiten, wie CO_2 in das Bergwasser gelangen kann.

• A) Organische Herkunft

Das Kohlendioxid entsteht im Boden durch die Tätigkeit von Zellulose-vergärenden Bakterien, wobei der CO_2 -Gehalt der Bodenluft bis auf 7% ansteigen kann (normale Luft ca. 0,03% CO_2). Auch gewöhnliche Bodenluft enthält 0,4 bis 1,4% CO_2 .

• B) Anorganische Herkunft

magmatisch	postvulkanisch (Tertiär bis rezent) vulkanisch (rezent) tiefere magmatische Herde (= rezente Hydrothermen)
abyssisch	(Aufstieg aus dem Erdmantel) Graubündner Säuerlinge des unteren Engadins
metamorph aus Karbonaten	kontaktmetamorph an Magmaherden tiefenmetamorph unter 10 km Tiefe
chemisch aus Karbonaten	Lösung durch Hydrogenkarbonat-Wasser Oxidation von Sulfiden, Schwefelsäure

CO_2 entsteht also in den obersten Bodenschichten oder tief im Untergrund und mischt sich, bei Kontakt, allen uns bekannten Wassertypen bei. Deshalb enthalten Mineralresp. Tiefengrundwässer vielfach eine grosse Menge davon. Auch Oberflächen- und Quellwasser enthält oft Kohlensäure, die bei den im Boden stattfindenden biologischen Prozessen entsteht. Diese kohlensäurehaltigen Wässer haben im Vergleich zu reinem, «weichem» Wasser gegenüber allen Minera-

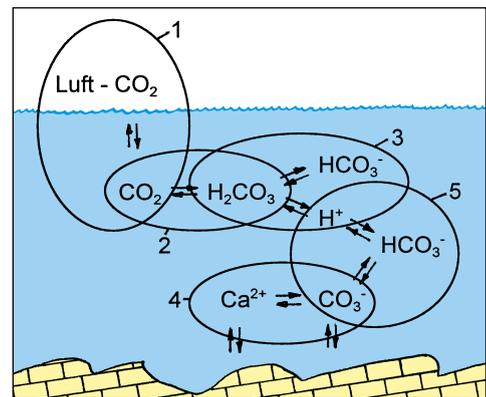
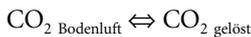


Abb. 1: Die verschiedenen Stufen der Kalkauflösung.

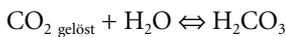
lien ein viel besseres Lösungsvermögen. Auch die Löslichkeit der Karbonate ist in hohem Masse vom Gehalt an freiem CO₂-Gas im Wasser abhängig. Ein mit Kohlensäure gesättigtes Wasser löst ca. 165 g/l Kalziumkarbonat, also 13'000 mal mehr als reines Wasser. Die Löslichkeit des Kalziumkarbonats wird durch das sogenannte Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht (oder TILLMANNSCHESES GESETZ) bestimmt.

Die Kalkauflösung, wie in Abb. 1 dargestellt, umfasst das Stoffsystem CO₂-H₂O-CaCO₃. Das System umfasst zahlreiche physikalische und chemische Prozesse, an denen alle Aggregatzustände – gasförmig, flüssig und fest – teilnehmen. Dadurch sind Reaktionen an den Interfaces notwendig. Nachfolgend das Schema in wenigen Schritten (vgl. dazu die Abb. 1).

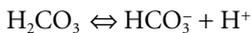
1. Das Bergwasser reichert sich mit CO₂ an.



2. Das gelöste CO₂ ist bei 4 °C zu 0,75% hydratisiert (Kohlensäure).



3. Als starke Säure ist H₂CO₃ völlig dissoziiert: 1. Oxidationsstufe.

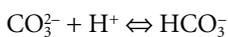


Die 2. Oxidationsstufe, die Zerlegung von HCO₃⁻ in CO₃²⁻ und H⁺, kann bei einem pH unter 8,5 wegen des geringen Anteils vernachlässigt werden (nicht aber bei hohen pH-Werten wie z.B. durch die Beeinflussung zementgebundener Baustoffe).

4. An der Grenzfläche Bergwasser-Kalkgestein werden die Ionen aus dem Kristallgitter herausgelöst. Ein rein physikalischer Vorgang.



5. Das neu entstandene CO₃²⁻ assoziiert sich mit dem H⁺ aus dem 3. Schritt.



6. Die Lösung verarmt an CO₃²⁻. Dadurch wird das Lösungsgleichgewicht mit dem festen CaCO₃ gestört, und das Ionenprodukt entspricht dem Löslichkeitsprodukt L.

$$[\text{Ca}^{2+}] [\text{CO}_3^{2-}] = L = 4,0 \cdot 10^{-9}$$

() = Aktivität des Klammerinhaltes

[] = Konzentration des Klammerinhaltes

Um das verbrauchte CO₃²⁻ zu ersetzen, wird erneut CaCO₃ in Lösung gehen (4. Schritt), wobei [Ca²⁺] gegenüber [CO₃²⁻] zunehmend überwiegt.

Durch den Verbrauch von H⁺ wird auch das Gleichgewicht zwischen der Kohlensäure und dem 1. Dissoziationsprodukt gestört, und es kommt zu einer erneuten Dissoziation.

Um das Gleichgewicht zu erhalten, wird gelöstes CO₂ hydratisiert und dadurch das Gleichgewicht zum Luft-CO₂ gestört, weshalb neues CO₂ aus der Bodenluft in das Bergwasser hineindiffundiert. Der Vorgang läuft nun so lange weiter, bis sich ein neues Gleichgewicht eingestellt hat. Durch die Addition der Schritte 2–5 ergibt sich die bekannte Sammelgleichung der Kalklösung



Der Ausfällungsvorgang

Durch die Ablagerungen vermindert sich der Abflussquerschnitt aller wasserführenden Elemente. Das kann dazu führen, dass die anfallenden Wassermengen nicht mehr abfließen können. In der Folge staut sich das Bergwasser auf und verursacht massive Schäden oder ebnet den Weg für andere Schadensmechanismen.

- Durch den Wasserdruckanstieg entstehen Risse (insbesondere horizontale Längsrissen) in der Rohbaustruktur, bis das Bergwasser einen neuen Weg zur Druckentspannung gefunden hat.

- Durch den Druckanstieg in den bergwasserführenden Klüften wird teilweise aggressives Bergwasser durch Betonbauteile gepresst und führt zu lokalen Schadstellen. Dies ist der Hauptgrund für die zahlreichen und massiven Schäden an Spritzbetonschalen.

- Druckwasser im Sohlbereich führt zu Hebungen und Rissen der Sohlplatten. Davon betroffen sind sehr viele Freispiegelstollen schweizerischer Kraftwerke, da bei diesen

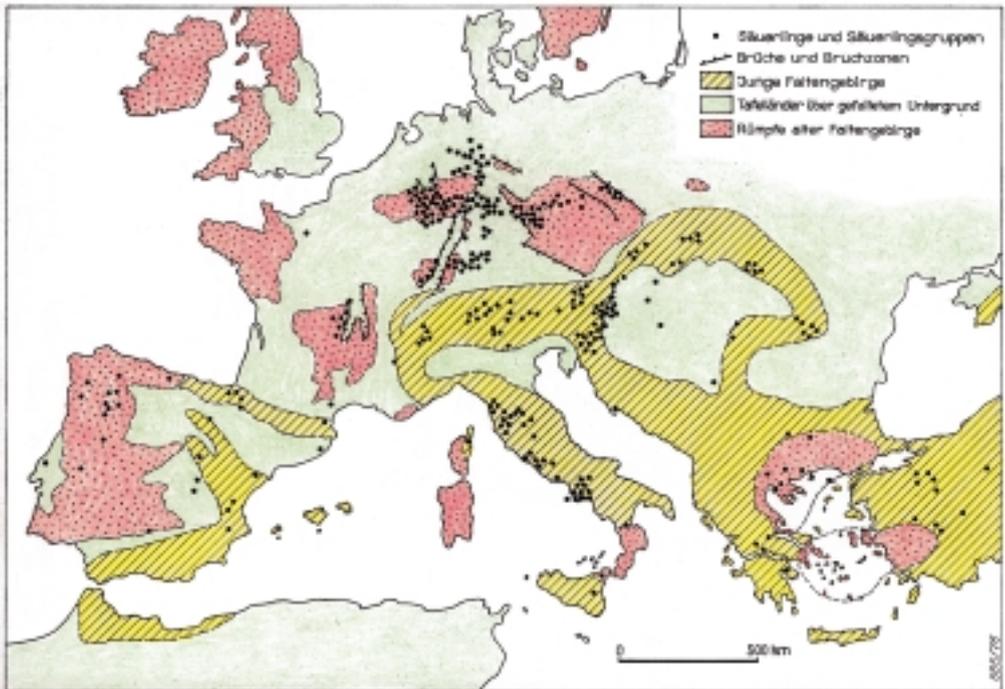


Abb. 2: Verbreitung der Säuerlinge in Europa (Carlé 1976).

Bauwerken auf eine wirksame Flächendrainage unter der Sohle und in der Regel auch im Gewölbe verzichtet wurde.

- Durch den Wasserdruckanstieg erhöht sich die allgemeine Wasserwegsamkeit entlang dem Bauwerk. Das Bergwasser wird in Zonen transportiert, die zuvor trocken waren. In quellfähigen Zonen wie Mergel, Ton und Anhydritschichten werden Schadensmechanismen ausgelöst, die irreversibel sind.

- Durch den Wasserdruckanstieg wird das flächenhafte Abdichtungssystem überfordert. Bereits vorhandene Leckstellen werden nun zu Problemzonen des ganzen Bauwerks. Es kommt zu Wassereintritten, die zu
 - Vernässungen und Eisbildungen (Portale),
 - Kurzschlüssen bei Fahrleitungen und elektrischen Installationen,
 - einem Anstieg der Luftfeuchtigkeit und dadurch zu einer Reduktion der Gebrauchstauglichkeit der betroffenen Infrastrukturanlage führen können.

Der Unterhalt des sekundären Entwässerungssystems ist deshalb ein zentraler Punkt

bei der Instandhaltung von Untertagebauwerken. Das Entfernen der Ablagerungen ist kostspielig, arbeitsintensiv und oft mit erheblichem Organisationsaufwand (Betriebsunterbrüche) verbunden. Defekte, funktionsuntüchtige oder fehlende Entwässerungssysteme sind dagegen eine Katastrophe!

Ablagerungen entstehen durch Veränderungen des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts. Dieses Gleichgewicht wird durch

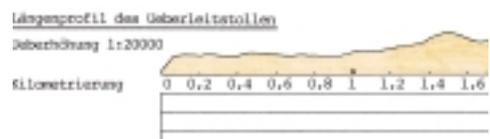


Abb. 3: Das verstopfte Entwässerungssystem führt zu einem Wasseranstieg. Es folgen Wasserdruckaufbau, Bruch der Innenschale, Wasserinfiltration usw. Die Aufnahme stammt aus dem Belchentunnel der A2.

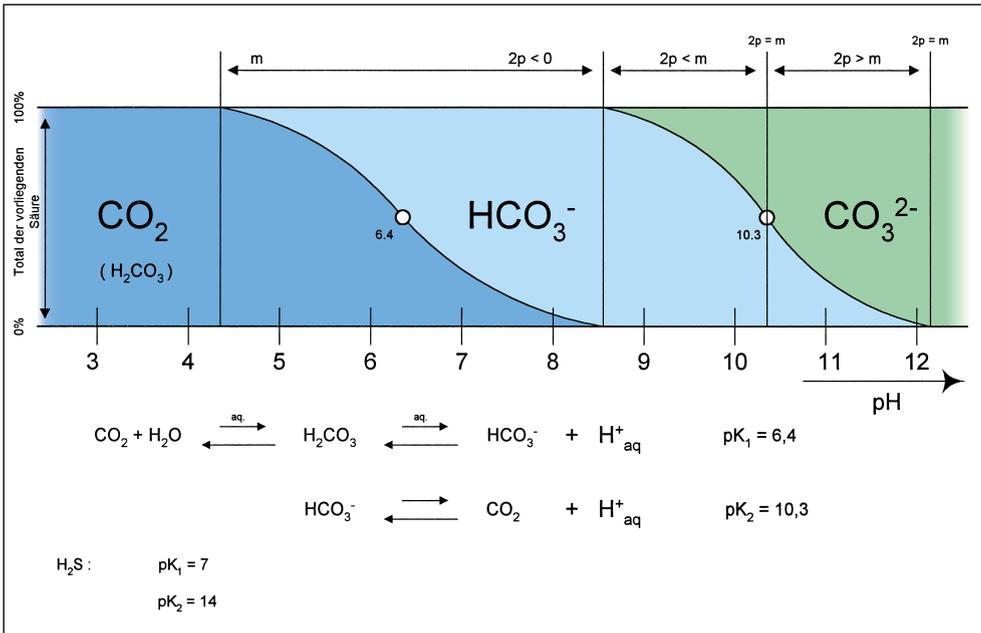


Abb. 4: Die Kohlensäure und ihre korrespondierenden Basen.

mehrere Parameter bestimmt, die sich zudem gegenseitig beeinflussen:

- CO_2 -Partialdruck der Umgebung
- Temperatur des Bergwassers
- Mineralisation des Bergwassers
- Druck auf das Bergwasser
- pH-Wert des Bergwassers

CO_2 -Partialdruck der Umgebung

CO_2 kann als einzige Systemkomponente in weiten Grenzen variieren. Der mittlere CO_2 -Partialdruck p'_{CO_2} der atmosphärischen Luft liegt zurzeit auf Meereshöhe bei 0,035% und reduziert sich mit zunehmender Höhe gegenüber dem Atmosphärendruck (p_{CO_2} auf 3000 m ü.M. 0,024%). In der Bodenluft steigt der Partialdruck auf Werte von bis zu 8,3% bezogen auf 760 mm Hg, was einem Anteil von 10,2% in der Bodenluft entspricht.

$$\text{CO}_2\text{-Partialdruck} = \frac{\text{CO}_2\text{-Gasdruck einer Luftprobe}}{\text{Gesamtdruck der Luftprobe}}$$

Tritt Bergwasser in ein Entwässerungssystem ein, so ist normalerweise $p_1 > p_2$. Das Bergwasser im Fels weist einen höheren Par-

tialdruck gegenüber der Tunnelluft (Umgebungsluft des Drainagesystems) auf und gibt somit CO_2 an die Luft ab. Die Konzentration der verschiedenen Systemkomponenten verändert sich dabei. Der Übergang von einem Medium ins andere wird durch die Diffusionskoeffizienten D des CO_2 in Luft und Wasser bestimmt.

$$D_{\text{in Luft}} = 0,138 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} (0^\circ \text{C}, 1 \text{ atm}); 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} (25^\circ \text{C})$$

$$D_{\text{in Wasser}} = 0,95 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} (0^\circ \text{C})$$

Die Diffusionsgeschwindigkeit im Wasser ist somit rund 10'000 mal kleiner als die in Luft und bestimmt daher die Reaktionsgeschwindigkeit.

Befindet sich das Bergwasser im Drainerohr in Ruhe (z.B. Einstau), dann wandern die CO_2 -Moleküle nur durch Diffusion an die Wasseroberfläche zum Austausch. An dieser Stelle bestimmt das Oberflächen-Volumen-Verhältnis A/V die Reaktionsgeschwindigkeit. Bei fließendem Wasser, insbesondere im Bereich von Unstetigkeiten, ändern sich diese Bedingungen grundlegend. Durch die Wasserbewegung wird immer neues CO_2 an die Grenzfläche geführt und durch Konvektion weggeführt. Da die Was-

serbewegungen um Zehnerpotenzen grösser sind als die Diffusionsgeschwindigkeit, erreichen wir im ganzen Wasservolumen annähernd die gleiche Konzentration. Die Anpassung des CO_2 -Partialdrucks an die Umgebungsbedingungen erfolgt bei fließendem Wasser unvergleichbar schneller als in stehendem Wasser.

Das Verhalten des CO_2 in einem Sinterrohrchen verdeutlicht den Reaktionsmechanismus. Roques (1964, 1969a) untersuchte die Tropfen, die am unteren Ende von Stalaktiten ansetzten. Die Wanderung der Röhrenchen ist dicht, so dass kein Kontakt mit der Aussenluft besteht. Das Wasser besitzt im Innern des Röhrens den CO_2 -Partialdruck $p_1 > p_2$. Durch CO_2 -Abgabe ändert sich der p_{CO_2} von p_1 über p' nach p_2 , parallel dazu die Konzentration C_1 über C' nach C_2 , wo das Gleichgewicht erreicht wird.

Fällt der Tropfen schon nach 0,1 s ab, dann sinkt die CO_2 -Konzentration um 16%. Bei 4 s sind es nur noch 9%, da infolge der geringen Fließgeschwindigkeit die Turbulenzen so schwach sind, dass sich eine Grenzschicht aufbauen kann, in welcher die Diffusion den Ablauf der CO_2 -Abgabe bestimmt. Mit zunehmender Bildungsdauer nimmt die Turbulenz weiter ab. Erst bei etwa 4 h wird τ erreicht (τ bezeichnet die Zeit, die verstreicht, bis 90% des Konzentrationsunterschiedes ausgeglichen sind).

Nach der Bildung fällt der Tropfen angehängert als Kugel auf den Boden (Fallhöhe im Diagramm 1 m). Beim Aufschlag und dem nachfolgenden Wegfließen werden bei 0,1 s, 4 s und 4 h Tropfenintervall 70% bzw. 81% und 8% des gesamten CO_2 abgegeben.

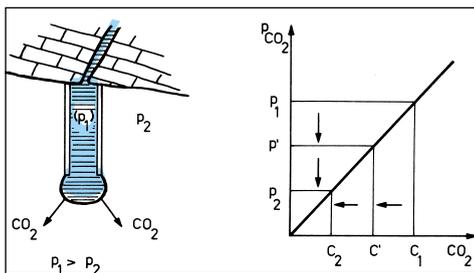


Abb. 5: Verhalten des CO_2 im Wasser eines Sinterrohrchens.

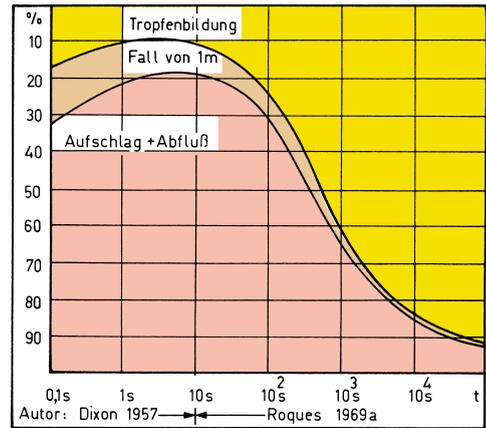


Abb. 6: Diagramm der CO_2 -Verluste während der Bildung der Tropfen, während des Fallens und beim Wegfließen bezogen auf die Bildungszeit t des Tropfens (nach Roques, 1969a).

Fazit: Beim Eintritt von Bergwasser in ein Entwässerungssystem kommt es zur Angleichung des CO_2 -Partialdrucks im Bergwasser p_1 mit der Umgebungsluft p_2 des Entwässerungssystems. Bei fließendem Wasser, insbesondere im Bereich von Turbulenzen, findet dieser Ausgleich um ein Vielfaches schneller statt als bei stehendem Wasser. Durch den CO_2 -Druckausgleich ändern sich gleichzeitig die Systemkomponenten des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts, und im Normalfall ($p_1 > p_2$) wird dabei Kalk ausgeschieden. Diese Reaktion läuft in einem konventionellen Entwässerungssystem recht langsam ab, sodass sich die Versinterungen bereits beim Zuströmen des Bergwassers auf das Bauwerk im Fels bilden können und am Ende des Entwässerungssystems beim Portal noch längst nicht abgeschlossen sind. Oft ist das System chronisch stark übersättigt, sodass bereits kleinste Unstetigkeiten unverhältnismässige Ablagerungen verursachen können.

Temperatur des Bergwassers

Grundsätzlich nimmt die Löslichkeit der Erdalkal karbonate mit zunehmender Temperatur ab. Die Kurven der Temperaturabhängigkeit sind noch immer nicht lückenlos

CaCO ₃ ppm	10 °C auf 0 °C	20 °C auf 10 °C	24 °C auf 15 °C
120	1,9	2,7	2,8
200	7,7	10,9	11,4
280	18,8	26,3	27,1

Tab. 1: Zusätzlich lösbares CaCO₃ (ppm) bei Abkühlung von T₁ auf T₂.

experimentell bestimmt worden. Nach Bögli ergeben sich bei einer Bergwasserabkühlung die in der Tabelle angegebenen zusätzlich lösbaren Kalkmengen.

Die angegebenen Kalkmengen erscheinen recht hoch, die Abkühlungsraten liegen im Untertagebereich jedoch selten bei >10 °C.

Mineralisation des Bergwassers

Die Löslichkeit einer Lösungskomponente ist stets von einer Reihe von Faktoren abhängig. Dazu zählen neben der Temperatur, dem pH-Wert und der Wechselwirkung mit dem gelösten Gas auch die Zusammensetzung der Lösung und die Redox-Verhältnisse.

Sind im Bergwasser zusätzlich Salze vorhanden (z.B. Na, Cl usw.), können diese die Löslichkeit erhöhen oder herabsetzen. Es gilt in der Regel, dass gleichionige Zusätze eines Salzes die Löslichkeit herabsetzen, während ungleichartige Ionen die Löslichkeit erhöhen können. NaCl hemmt beispielsweise die Dissoziation der Kohlensäure. Dagegen steigert NaCl die Löslichkeit von CaCO₃. Der Einfluss auf das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht beträgt bei geringen Salzgehalten (unter 1% NaCl) um die 25–35%.

Weitere Beispiele:

- Hohe Kalziumsulfatgehalte im Bergwasser begünstigen die Versinterungsbildung.
- Zunahme der Löslichkeit von CaSO₄ bei steigenden NaCl-Konzentrationen.
- Magnesium wirkt als Stabilisator und hemmt dadurch die Ablagerungsbildung ganz erheblich. Der Einfluss auf die Löslichkeit ist eher gering.

Bei Konzentrationen über einigen g/l, d.h. bei fast allen Mineralwässern, sind die Ein-

Einheit: Normkubikzentimeter [Ncm³/g]
Gramm

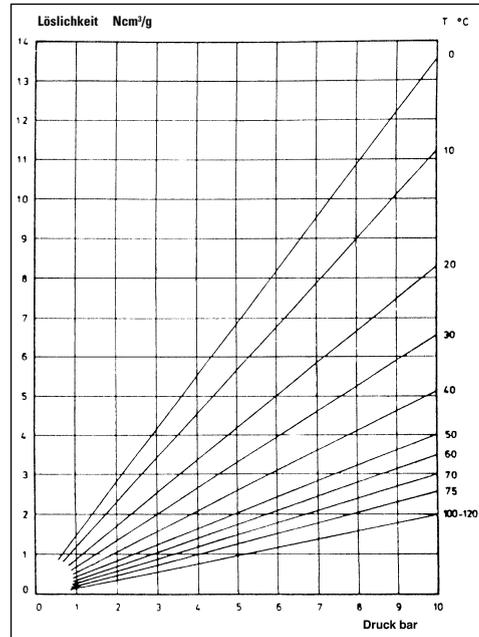


Abb. 7: Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid in Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur.

flüsse der Lösungsgenossen nicht zu unterschätzen. Eine rechnerisch exakte Erfassung ist aber schwierig und aufwendig.

Druck auf das Bergwasser

Durch einen geringen Bergwasserdruckanstieg (wenige Bar) ändert sich an der Löslichkeit nichts und der Kalzium-Sättigungsindex bis zu einem Bergwasserdruck von 100 bar (entspricht 1000 m Wassersäule) variiert nur um den Faktor 0,1. Sind aber bereits Gasblasen im Bergwasser eingeschlossen, z.B. als Folge einer Druckentlastung beim Zuströmen des Bergwassers auf den Untertagebauhohlraum, so ändert sich die Situation grundlegend. Die Gasblasen sind entgegen dem Wasser komprimierbar und demzufolge steigt der Partialdruck p_{CO₂} linear zur Druckzunahme (V · p = konst.). Im Grenzbereich Gasblase-Wasser wird das Wasser korrosiv und löst zusätzlichen Kalk aus dem Gestein/Bauwerksverkleidung. Diese Aussagen

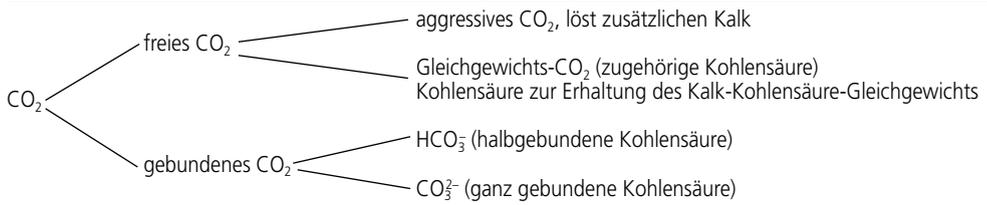


Abb. 8: Der CO₂-Gehalt einer Wasserprobe kann in 4 Kategorien aufgeteilt werden.

Hydrogenkarbonat CO ₂ mg/l	Ca ²⁺ mmol/l	freies zugehöriges CO ₂ mg/l	pH-Wert	Hydrogenkarbonat CO ₂ mg/l	Ca ²⁺ mmol/l	freies zugehöriges CO ₂ mg/l	pH-Wert
10,24	0,12	0,00	–	219,2	2,45	32,53	7,34
30,08	0,34	0,25	8,59	224,0	2,50	35,04	7,32
35,1	0,40	0,34	8,53	228,8	2,55	37,68	7,29
39,4	0,46	0,44	8,48	234,4	2,62	40,75	7,27
50,1	0,57	0,69	8,38	240,0	2,68	44,11	7,25
55,13	0,63	0,84	8,33	244,8	2,73	46,98	7,23
61,1	0,68	0,99	8,30	249,6	2,79	50,18	7,21
66,4	0,74	1,19	8,27	254,7	2,84	53,60	7,19
71,3	0,80	1,37	8,22	260,0	2,90	57,30	7,17
76,8	0,86	1,61	8,19	264,9	2,96	60,76	7,15
81,6	0,91	1,83	8,17	270,4	3,02	64,80	7,13
86,4	0,96	2,10	8,12	275,2	3,07	68,36	7,11
91,6	1,02	2,39	8,09	280,0	3,13	72,06	7,10
96,8	1,08	2,72	8,06	285,6	3,18	76,38	7,08
101,9	1,14	3,06	8,03	291,2	3,25	80,94	7,07
108,0	1,20	3,54	7,99	296,0	3,30	84,85	7,05
112,0	1,25	3,86	7,97	300,8	3,36	89,28	7,04
116,8	1,30	4,32	7,94	305,6	3,41	93,70	7,02
122,4	1,37	4,85	7,91	310,4	3,46	97,97	7,01
128,0	1,43	5,52	7,87	321,6	3,59	108,15	6,98
132,4	1,48	6,05	7,85	326,4	3,64	112,58	6,97
137,6	1,54	6,81	7,81	331,2	3,70	117,58	6,96
142,5	1,59	7,55	7,79	336,0	3,75	122,58	6,95
148,0	1,65	8,54	7,75	340,8	3,80	127,36	6,94
152,8	1,70	9,42	7,72	346,4	3,87	132,94	6,93
158,4	1,77	10,63	7,68	352,0	3,93	138,68	6,91
163,2	1,82	11,67	7,66	356,8	3,98	143,66	6,90
169,6	1,89	13,48	7,62	361,6	4,04	149,04	6,89
173,1	1,93	14,45	7,59	366,4	4,09	154,48	6,88
179,2	2,00	16,32	7,55	372,0	4,15	160,00	6,88
183,3	2,05	17,60	7,53	377,6	4,21	166,52	6,87
188,8	2,11	19,52	7,50	382,4	4,27	171,12	6,86
193,6	2,16	21,22	7,47	387,2	4,32	176,72	6,85
198,4	2,21	23,22	7,44	392,0	4,38	181,92	6,84
203,5	2,27	25,34	7,41	397,6	4,44	188,00	6,83
209,6	2,34	27,95	7,38	403,2	4,50	194,20	6,83
214,4	2,39	30,02	7,36	408,0	4,55	199,50	6,82

Tab. 2: Zusammenhang zwischen Hydrogencarbonat-CO₂, Carbonationen der Erdalkalien, freiem zugehörigem CO₂ und dem pH-Wert der entsprechenden Gleichgewichtswässer.

CO₂ - Diffusionsgradiente in stehender Wassersäule

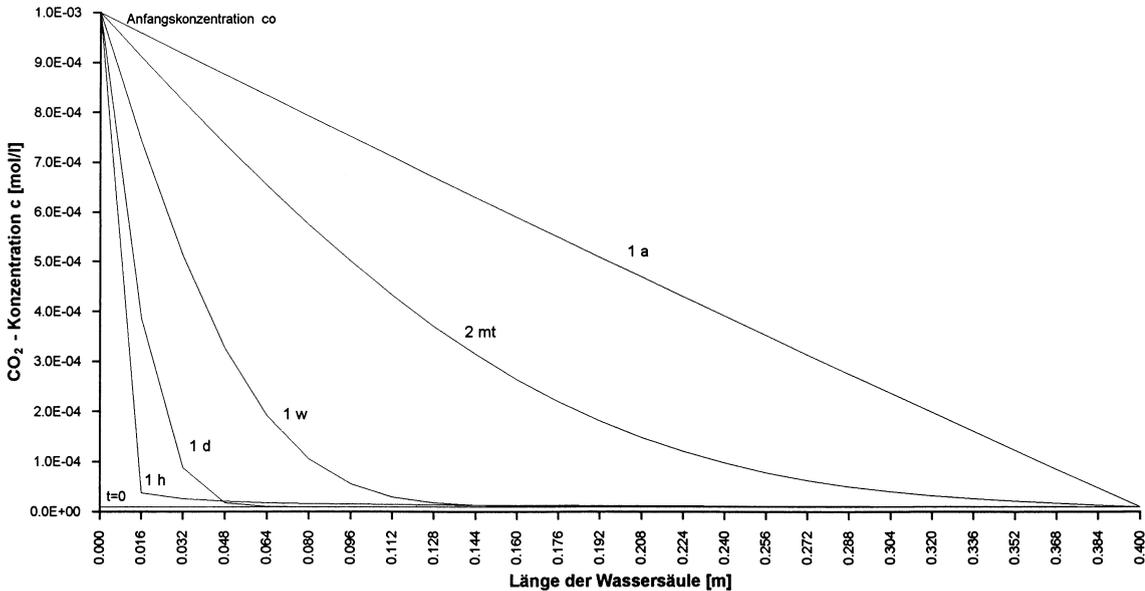


Abb. 9: Anpassung des CO₂-Gehalts einer 40 cm langen Wassersäule an den CO₂-Gehalt der Umgebungsluft mit der Anfangskonzentration c_0 . Bis zum vorläufigen Ausgleich verstreicht ~ 1 Jahr.

gelten für den Fall, dass der CO₂-Gehalt konstant bleibt. In der Praxis ist dies jedoch fast nie der Fall, da sich in tieferen Erdschichten meist ein Überangebot an CO₂ finden lässt. Bei einem Druckanstieg auf das Bergwasser wird demnach in einem ersten Schritt zusätzliches CO₂ in Lösung gehen (vgl. dazu die Abb. 8), und zwar linear zum Druckanstieg. Dieses zusätzliche CO₂ im Bergwasser wird in einem zweiten Schritt weiteren Kalk auflösen, wodurch klar wird, weshalb Bergwässer, die unter Druck stehen, unvergleichbar mehr Ablagerungen verursachen können als jene ohne Druck.

pH-Wert des Bergwassers

Das System CO₂-H₂O-CaCO₃ wird ganz wesentlich vom pH-Wert beeinflusst.

In der Tabelle 2 ist der Zusammenhang zwischen Hydrogenkarbonationen, Karbonationen der Erdalkali, freiem zugehörigem CO₂ und pH-Wert der entsprechenden

Gleichgewichtswasser wiedergegeben. Die Angaben beziehen sich auf eine Temperatur von 25 °C. Bei Entfernung des CO₂, z.B. durch Entgasung, oder durch pH-Wert-Anstieg geht das Hydrogenkarbonat in das entsprechende Karbonatsalz über:



Variation der Parameter-Konsequenzen für das Entwässerungssystem.

Wir haben nun die wichtigsten Einflussfaktoren des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts besprochen.

Es waren dies:

- CO₂-Partialdruck der Umgebung
- Temperaturen des Bergwassers
- Mineralisation des Bergwassers
- Druck auf das Bergwasser
- pH-Wert des Bergwassers

Für die Versinterungsbildung im Entwässerungssystem führt dies zu den folgenden praktischen Konsequenzen:

Praktische Möglichkeiten zur Beeinflussung der Versinterungsbildung

Um in jedem Gebirge und für alle Bauwerke einen ausreichenden Schutz vor Versinterungen zu erreichen, empfehlen sich folgende Massnahmen:

Durch Veränderung des CO₂-Partialdrucks können Ablagerungen entstehen

Möglichkeiten zur Reduktion der Ablagerungen	Umstände, die zur Verstärkung der Ablagerungen führen
<ul style="list-style-type: none"> ● Abflussregime ruhig halten, um das Ausgasen des CO₂ zu minimieren ● glatte Oberflächen erzeugen weniger Turbulenzen (keine Unstetigkeiten) ● grosse Rohrfüllung anstreben, damit das Verhältnis Bergwasservolumen zu freier Oberfläche klein gehalten werden kann 	<ul style="list-style-type: none"> ● hoher Bergwasserdruck im Fels führt zu einem grossen Partialdruckgefälle $p_1 : p_2$ ● Gebiete, in denen CO₂ im Untergrund produziert wird und sich dem Bergwasser beimischt, sind extrem stark gefährdet (z.B. Kanton Graubünden oder in Deutschland der Raum Frankfurt)

Veränderung der Temperatur des Bergwassers

Reduktion der Ablagerungen	Verstärkung der Ablagerungen
<ul style="list-style-type: none"> ● Mischung von kalten und warmen Ca-reichen Quellen führt immer zu einer minimalen Reduktion der Ablagerungen 	<ul style="list-style-type: none"> ● seltener Fall, bei Erwärmung des Bergwassers im Tunnelinnern

Mineralisation des Bergwassers

Reduktion der Ablagerungen	Verstärkung der Ablagerungen
<ul style="list-style-type: none"> ● Zusammenführen von 2 verschiedenen Wassertypen führt immer zu einer Reduktion der Gesamtablagerungen, weil Ablagerungen der Mischung = $\left[\frac{\sqrt{\text{Ablagerung Typ 1}}}{2} + \frac{\sqrt{\text{Ablagerung Typ 2}}}{2} \right]^2 \neq \left[\frac{A_1 + A_2}{2} \right]$ ● hohe NaHCO₃-Gehalte reduzieren die Ablagerungen deutlich (Stabilitätsindex > 7,5) ● Magnesium vermindert Kalkablagerungen, Mg-Gehalte > 50 mg/l reduzieren die natürlichen Kalkablagerungen ganz erheblich ● Sickerleitung kurzschliessen ● Querleitungen verschliessen oder halb verschliessen (Abfluss möglich bei Starkwasseranfall) ● Beimischung von schwach mineralisiertem Bergwasser in die Entwässerungsleitung mit Versinterungen ● Zugabe von Härtestabilisatoren in fester oder flüssiger Form beeinflusst das Wachstum der Kalkkristalle und verhindert dadurch die Entstehung harter Ablagerungen 	<ul style="list-style-type: none"> ● hohe Ca-Gehalte, Ca₂SO₄-Gehalte und hohe Karbonathärte verstärken die Ablagerungen ● kurze Bergwasserleitungsabschnitte ● zementöse Baustoffe aller Art liefern die Grundsubstanz für die Ablagerungen Ca ● kalkhaltige Zuschlagstoffe

pH-Wert des Bergwassers

Reduktion der Ablagerungen

- alle Massnahmen, die den Kontakt des Bergwassers mit zementösen Baustoffen reduzieren, z.B. mittels Entlastungsbohrungen in der Spritzbetonschale
- Entlastungsbohrungen ins Gebirge
- Sickerschlitze in der Sohle über die ganze Bauwerksbreite
- Sickerschichten/Drainagematten zwischen Fels und Spritzbetonschale

Verstärkung der Ablagerungen

- ungeeignete Beschleuniger / Zemente / Baustoffe
- Injektionen mit Zement

Druck des Bergwassers

Reduktion der Ablagerungen

- grosser Versinterungshohlraum um das Bauwerk führt zur frühzeitigen Druckentlastung und Entgasung des Bergwassers
 - Die Versinterungen entstehen im Versinterungshohlraum um das Bauwerk
 - Die Drainagerohre werden geschützt
- aufgelockerte/zerklüftete Felsformationen
- junges schwach mineralisiertes Bergwasser von oben ohne Druckentlastung
- vollständiges Absenken des Bergwasserspiegels, damit sich kein Wasserdruck aufbauen kann

Verstärkung der Ablagerungen

- Injektionen führen zu einer hohen Gebirgsdichte und damit zu einer kurzfristigen Entspannung des Bergwassers unmittelbar beim Bauwerk
- monolithische Bauweise ohne Hohlräume zwischen Bauwerk und Fels führen zu steilen Druckgradienten. Entspannung des Bergwassers sehr kurzfristig im Drainagerohr, Drainagematte/Kiesschicht

Berechnung der Versinterungsbildung im sekundären Entwässerungssystem anhand der Bergwasserzusammensetzung

Jedes Bergwasser hat ein bestimmtes Potential, Ablagerungen zu verursachen. Dieses Potential lässt sich rechnerisch abschätzen. Die Neigung eines Bergwassers, Ablagerungen zu bilden, kann auf verschiedene Arten berechnet werden. Es stehen dazu zur Verfügung:

- Kalzium-Sättigungsindex
- Stabilitätsindex SI nach Ryznar

In der Praxiswelt der Wasserbehandlungsfirmen hat sich der Stabilitätsindex SI

(nach Ryznar) durchgesetzt. Der Stabilitätsindex besteht einerseits durch die Einfachheit seiner Berechnung und andererseits durch seine breite Aussagekraft. Die Indexwerte zeigen dabei nicht nur etwaige Ablagerungstendenzen einer untersuchten Wasserprobe an, sondern identifizieren auch potentiell korrosive Eigenschaften einer Wasserprobe (bezüglich Metalle). Die nachfolgende Tabelle verdeutlicht die Anwendungsbreite des Indexes (Abbildung Seite 102).

Berechnung des Stabilitätsindex (SI) nach Ryznar

Die Grundlage zur Berechnung des Stabilitätsindex (SI) bildet eine oder mehrere Wasserprobenanalysen. Die Wasserprobe muss «frisch» sein (< 24 h) und sollte nach

Möglichkeit vor Ort, auf der Baustelle, analysiert werden. Bei Analysen in einem nahegelegenen Labor verändert sich durch den Transport der CO₂-Gehalt des Bergwassers. Jede Transportmethode verursacht Erschütterungen und führt damit zum Ausgasen des gelösten CO₂ und provoziert gleichzeitig eine vorzeitige Kalkausfällung. Dadurch werden die Resultate abgeändert und man erhält Werte einer Wasserprobe, wie wenn sie beim Portal entnommen worden wäre.

Der Stabilitätsindex berechnet sich wie folgt:

$$SI = 2[\text{Sättigungs-pH-Wert}] - [\text{pH-gemessen}] = 2[(9,3 + S + T) - (H + A)] - [\text{pH-gemessen}]$$

[Sättigungs-pH-Wert]

S = Salzgehalt H = Kalziumhärte
T = Temperatur A = Alkalität

Grundsätzlich gilt, dass ein Stabilitätsindex < 7 ablagernd ist und Werte > 7,5 als kor-

Gesamtsalz [mg/l]	S	Kalziumhärte		H	Gesamtalkalität [mmol/l]	A
		[mmol/l]	[°dH]			
		0,2	0,56	0,6	0,2	1,0
50– 300	0,1	0,24	0,67	0,7	0,24	1,1
400–1100	0,2	0,28	0,78	0,8	0,28	1,2
		0,36	1,01	0,9	0,36	1,3
Temperatur [°C]	T	0,46	1,29	1,0	0,46	1,4
		0,56	1,57	1,1	0,56	1,5
0	2,6	0,7	1,96	1,2	0,72	1,6
2	2,5	0,88	2,46	1,3	0,9	1,7
7	2,4	1,12	3,14	1,4	1,12	1,8
10	2,3	1,4	3,92	1,5	1,4	1,9
14	2,2	1,76	4,93	1,6	1,76	2,0
18	2,1	2,22	6,22	1,7	2,22	2,1
22	2,0	2,78	7,78	1,8	2,8	2,2
28	1,9	3,5	9,8	1,9	3,54	2,3
32	1,8	4,6	12,88	2,0	4,6	2,4
38	1,7	5,6	15,68	2,1	5,6	2,5
44	1,6	7,0	19,6	2,2	7,2	2,6
51	1,5	8,8	24,64	2,3	9,0	2,7
57	1,4	11,2	31,36	2,4	11,2	2,8
64	1,3	14,0	39,2	2,5	14,0	2,9
72	1,2	17,4	48,72	2,6	17,6	3,0
82	1,1	21,0	58,8	2,7		

Tab. 3: Berechnung der Versinterungsneigung eines Bergwassers.

In der Folge ein Zahlenbeispiel. Die Wasserprobe ergab:

Analysewerte:	Tabellenwerte:
pH-Wert 8	pH-gemessen = 8
Salzgehalt 1100 mg/l	S = 0,2
Temperatur 22 °C	T = 2,0
Kalziumhärte 12,9 °dH = 92 mg/Ca/l = 4,57 mmoleq/l = 4,57 mval	H = 2,0
Alkalität (m-Wert) 5,6 mval/l	A = 2,5

$$SI = 2[(9,3 + 0,2 + 2,0) - (2,0 + 2,5)] - [8] = 6,0$$

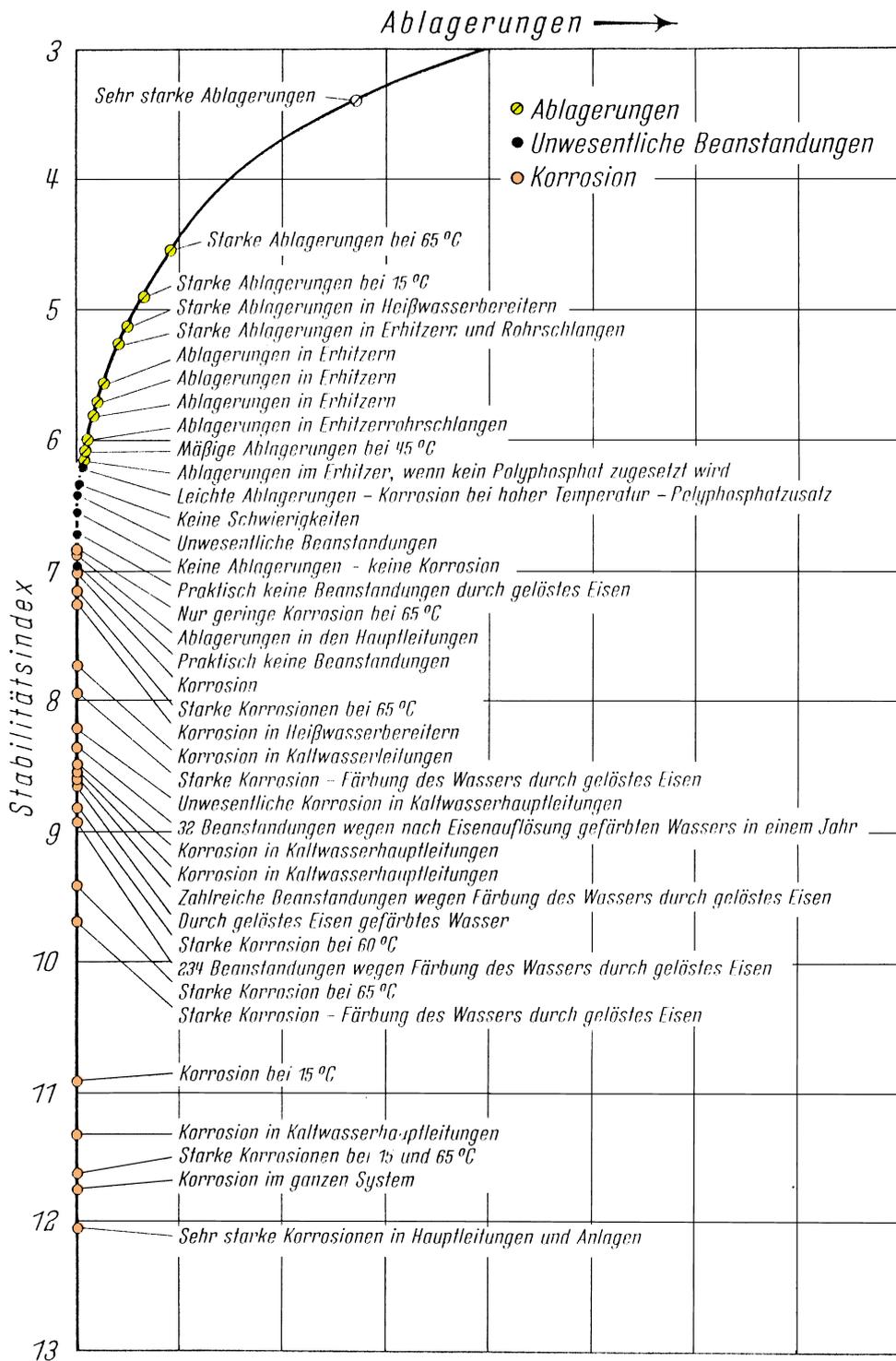


Abb. 10: Stabilitätsindex SI nach Ryznar.

rosiv einzustufen sind. Unsere Wasserproben aus dem obigen Zahlenbeispiel wären demnach in den ablagernden Bereich einzureihen.

Für die Bestimmung der Wasserparameter hier noch ein paar Details:

- Die Bestimmung des pH-Wertes sollte 3–4 mal wiederholt werden. Die erste Messung soll bei der Wasseraustrittsstelle, vor Ort, erfolgen, dies ergibt den ersten Wert. In kurzen Abständen soll die Bestimmung wiederholt werden (15 min, 1 h). Der pH-Wert wird sich, als Folge der CO₂-Ausgasung, nach oben bewegen. Der ungefähre Endpunkt der pH-Wert-Verschiebung lässt sich nun auf einem Diagramm einfach interpolieren. Der Endpunkt soll in die Berechnung als pH-Wert-gemessen eingehen.

- Das pH-Messgerät muss Temperaturen kompensieren können.

- Das Leitfähigkeits-Messgerät muss Temperaturen ebenfalls kompensieren können. Es gilt, dass die Leitfähigkeit der Probe [$\mu\text{S}/\text{cm}$] multipliziert mit dem Faktor 0,7 in etwa den Gesamtsalzgehalt ergibt.

- Ca-Härte und Alkalität lassen sich durch Titration einfach bestimmen. Dazu sind auf dem Markt vorbereitete Indikatorlösungen erhältlich.

Nach der Berechnung des Stabilitätsindex SI kann die Verknüpfung mit der sogenannten Versinterungsrate hergestellt werden. Dabei muss unterschieden werden, ob sich die Ablagerungen im primären Entwässerungssystem (Felsklüfte, Vliese, Drainage-

	Hauenstein Basistunnel	Alter Hauenstein	Simplon	Adler	Belchen Süd Kalkmilch!	Isla Bella
Ø der anfallenden Wassermenge beim Portal	20 l/s	15 l/s	4 l/s	6 l/s	1 l/s	15 l/s
Ø Karbonathärte des anfallenden Bergwassers	14,9 °dH	15,5 °dH	61 °dH	16 °dH	40 °dH	19,9 °dH
Stabilitätsindex SI des Bergwassers	5,9	5,7	3,6	5,3	3,0	5,8
Anzahl der Entwässerungsleitungen pro Querschnitt	1 Stk.	2 Stk.	1 Stk.	1 Stk.	1 Stk.	3 Stk.
Versinterungsmenge [kg], die im Schnitt in 1 m Entwässerungsleitung pro Jahr abgelagert wird	3,5 kg/m'	2,5 kg/m'	bis 10 kg/m'	3 kg/m'	bis zu 20 kg/m'	2 kg/m'

	Crapteig	Arisdorf	Quarten	Mühlberg	Zugwald	Steg
Ø der anfallenden Wassermenge beim Portal	7 l/s	2 l/s	3 l/s	2,5 l/s	6 l/s	0,5 l/s
Ø Karbonathärte des anfallenden Bergwassers	13,44 °dH	12,3 °dH	16,6 °dH	10,9 °dH	47,6 °dH	9 °dH
Stabilitätsindex SI des Bergwassers	6	5,6	6	4 (pH-Wert > 11)	5,6	5,9
Anzahl der Entwässerungsleitungen pro Querschnitt	3 Stk.	1 Stk.	2 Stk.	2 Stk.	1 Stk.	1 Stk.
Versinterungsmenge [kg], die im Schnitt in 1 m Entwässerungsleitung pro Jahr abgelagert wird	1,6 kg/m'	3,7 kg/m'	1,7 kg/m'	5,6 kg/m'	5 kg/m'	1 kg/m'

Tab. 4: Zusammenstellung einiger Tunnelbauwerke mit Angaben zum Versinterungsverhalten des Bergwassers im sekundären Entwässerungssystem.

matte, Sickerpackungen), also im nicht zugänglichen Teil, oder im sekundären Entwässerungssystem (Sickermatte, Schächte, Leitungen), dem zugänglichen Teil des Entwässerungssystems, bilden. Eine sichere Prognose über die zu erwartenden Ablagerungen lässt sich nur für primäre Entwässerungssysteme aufstellen, denn im sekundären Entwässerungssystem wird die Zahl der mitbestimmenden Parameter zu gross und die Abschätzung dadurch zu ungenau.

Für das **sekundäre Entwässerungssystem** genügt uns eine Abschätzung der Versinterungsmenge, die im Schnitt in 1 m Entwässerungsleitung pro Jahr abgelagert wird (vgl. dazu die Tabelle 4). Dadurch können wir den Reinigungsaufwand abschätzen und die technischen Rahmenbedingungen entsprechend anpassen. Wichtig ist, dass die nachfolgenden Parameter vorgängig aufgrund fundierter Unterlagen bestimmt werden:

- Anzahl und Durchmesser der Leitungen
- Abstand der Spülschächte
- Ausbildung der Schächte (HD-Spülung Fräsen, Zugänglichkeit für Roboter, Absaugen der Kalkrückstände, Schlamm)
 - Längsgefälle (ein geringes Längsgefälle erhöht den Reinigungsaufwand sehr stark)
 - Materialwahl
 - Reparatur- und Sanierungsmöglichkeiten (Umleitungen)
 - Reinigungsintervalle / Anzahl, Schichten, Management Reinigungssequenzen / Kosten, Verfügbarkeit
 - Standorte Härtestabilisationanlagen / Vorbereitende Einrichtungen wie Kabelschutzrohre werden sofort einbetoniert (die Installation der Anlage erfolgt aber erst bei Bedarf und während des Betriebs des Bauwerks).

Im **primären Entwässerungssystem** können diese Ablagerungen nicht entfernt werden. In diesem Teil des Bauwerks zwischen Fels und Drainagerohr kann aber die Menge der zu erwartenden Ablagerungen relativ einfach abgeschätzt werden. Die Berechnung ergibt dann die Grösse des Versinterungshohlraums, der notwendig ist, um die Versinterungen während der gesamten Lebensdauer des Bauwerks aufzunehmen. Die Einzelheiten zu dieser Berechnung folgen im nächsten Kapitel «Empfehlungen».

Die Mischungskorrosion – eine Möglichkeit zur Reduktion von Ablagerungen

Die Wahl eines optimalen Entwässerungssystems kann ganz entscheidend zur Reduktion von Versinterungen beitragen. Wie im vorigen Abschnitt bereits erwähnt, muss das Entwässerungssystem verschiedenen Randbedingungen gleichzeitig genügen,

- Dichtigkeit
- Unterhaltungsmöglichkeiten
- Dauerhaftigkeit
- usw.

Diese Randbedingungen sind in der Regel fest und werden nur in Notfällen verändert. Trotzdem bestehen noch einige Möglichkeiten zur Optimierung. Nachfolgend die wichtigsten:

Es gilt der Grundsatz «Je grösser die Wassermenge im Entwässerungsrohr, umso besser», denn er richtet sich nach dem Phänomen der Mischungskorrosion. Verschiedene Wissenschaftler erkannten bereits in den 30er Jahren des letzten Jahrhunderts, dass sich im Gleichgewicht befindliche Wasser

	keine Ablagerungen	wenig Ablagerungen	mittlere Ablagerungen	starke Ablagerungen	sehr starke Ablagerungen	Exremwert Simplontunnel
SI	> 7,5	7,5–7	7–6,5	6,5–5,5	< 5,5	3,6
V_R [°dH]	0 °dH	1 °dH	2 °dH	2–5 °dH	5–10 °dH	8 °dH
V_R [mg CaCO ₃ /l]		18 mg/l	36 mg/l	36–89 mg/l	89–178 mg/l	142 mg/l

Tab. 5: Versinterungsrate.

ppmCO₂

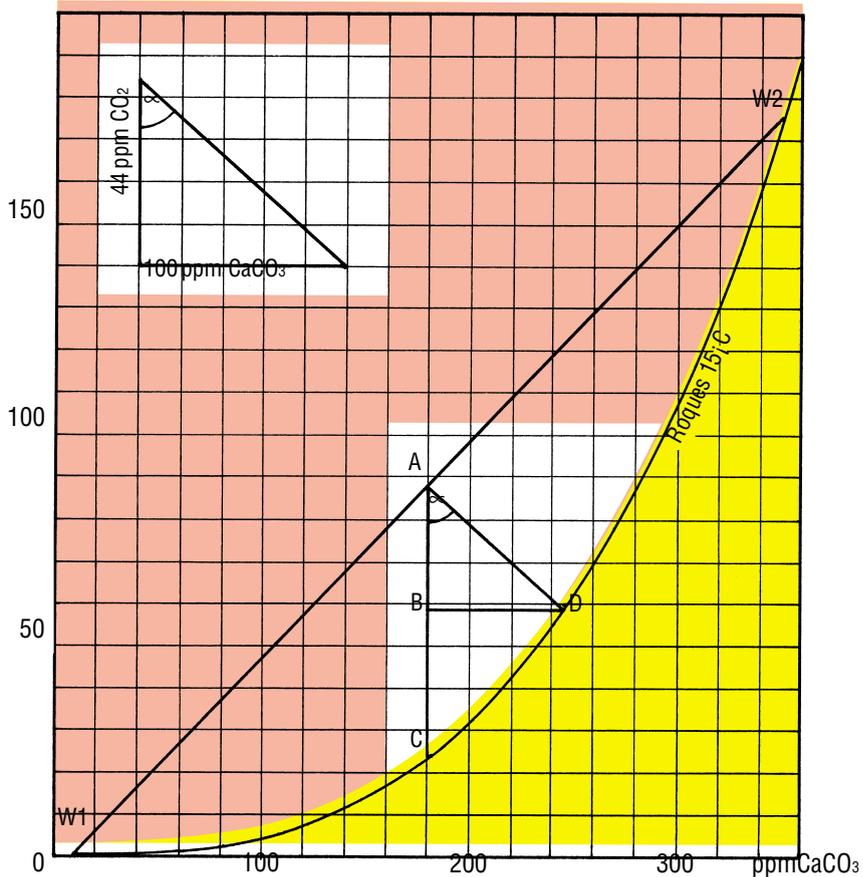


Abb. 11: Das Diagramm zeigt die Mischung verschiedener Gleichgewichtswässer W₁ + W₂, deren Resultat ein Mischwasser A mit aggressiven Eigenschaften ist.

beim Mischen mit anderen Gleichgewichtswässern unterschiedlicher Ca²⁺-Konzentrationen wieder korrosiv werden. Erst im Laufe der 60er Jahre wurden die dazu geänderten theoretischen Grundlagen festgelegt. Um das Phänomen besser zu verstehen, betrachtet der Leser das Diagramm der Abb. 11.

Das Diagramm Abb.11 zeigt die Gleichgewichtskurve für Ca-gesättigte Wässer. Auf der oberen (konkaven) Seite befinden sich die kalkaggressiven Wässer mit CO₂-Überschuss, auf der unteren (konvexen) Seite die kalkübersättigten Wässer mit ablagernden Eigenschaften. Jede beliebige Mischung zweier Wässer, die sich im Ca-Gleichgewicht befinden, verläuft durch den kalkaggressiven Bereich. Dabei bewegt sich die Mischung auf

einer Geraden (im Diagramm dargestellt die Mischung der Gleichgewichtswässer W₁ und W₂, Mischungslinie W₁ W₂). Der durch die Mischung resultierende CO₂-Überschuss lässt sich graphisch bestimmen.

Im Diagramm dargestellt sind W₁, ein Wasser mit 10 ppm CaCO₃ und nur ca. 0,1 ppm CO_{2eq}, sowie W₂, ein Wasser mit 350 ppm CaCO₃ und 174 ppm CO_{2eq}. Eine Mischung solcher extremer Kalkgehalte kommt bei Untertagebauwerken oft vor, etwa dann, wenn die Überdeckung des Bauwerks sehr unterschiedlich ist und junges, schwach mineralisiertes Niederschlags- oder Schmelzwasser mit Wässern aus tiefen Erdschichten in Berührung kommt. Dies ist der Hauptgrund dafür, dass die Versinterungsstärke bei

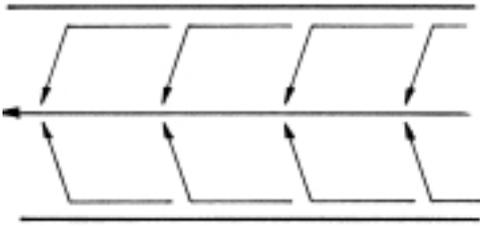


Abb. 12: Tunnel-Entwässerungssystem Normalfall.

Tunnelbauwerken gegen das Portal hin, also gegen Ende des Entwässerungssystems, in der Regel stark abnimmt oder ganz verschwindet. Die Mischung der Wässer W_1 und W_2 im Verhältnis 1:1 ergibt ein Wasser (A) mit einem Kalkgehalt von 180 ppm und 87 ppm CO_2 . Dieser Kalkgehalt benötigt aber nur 23 ppm CO_{2eq} (C), um stabil zu sein. Es ergibt sich ein CO_2 -Überschuss von 64 ppm (AC). Der Anteil AB wird zur Auflösung des zusätzlichen $CaCO_3$ benötigt, BC für die Zunahme des CO_{2eq} verbraucht. 1 mol $CaCO_3$ benötigt zur Auflösung 1 mol CO_2 . Dies ist der Grund, weshalb sich AB zu BD wie 1:1 bzw. wie 44 ppm CO_2 zu 100 ppm $CaCO_3$ verhält. Der resultierende Winkel α kann deshalb bei A zur geometrischen Bestimmung verwendet werden. BD ergibt die zusätzlich lösbare Kalkmenge.

Die beschriebene Methode zur Bestimmung der Eigenschaften einer Wassermischung beschränkt sich natürlich nicht allein auf Gleichgewichtswasser, sondern kann analog für kalkaggressive und/oder kalkübersättigte Wässer angewendet werden.

Nun wird deutlich, wieso sich das Zusammenführen verschiedener Wässer in einem bestehenden Entwässerungssystem in jedem Fall positiv auf das Versinterungsbild auswirkt. Diese Feststellung korreliert mit den uns vertrauten Bildern aus der Praxis. Sehr oft treffen wir auf Entwässerungssysteme, bei denen starke Versinterungen durch kleine Wassermengen verursacht werden. Besonders gefährdet sind:

- feingliedrige Entwässerungssysteme wie z.B. Hangentwässerungsanlagen, Deponie-sickerleitungen
- Entwässerungssysteme von Stützmauern, Tagbautunneln, Galerien

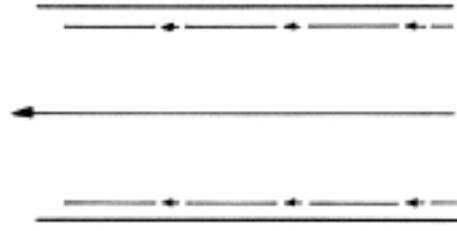


Abb. 13: Bessere Lösung.

- fast ohne Ausnahme die Stollen und Kontrollgänge von Staumauern
- Gewölbedrainagen bei Tunnelbauwerken usw.

Für die Praxis ergeben sich ganz entscheidende Konsequenzen für die Planung neuer und den Unterhalt bestehender Entwässerungssysteme.

- Reduzieren Sie die Anzahl der Entwässerungsleitungen immer auf ein Minimum (Drainage- und normale Rohre).
- Achten Sie darauf, immer so viel Bergwasser in einer Leitung zu führen wie nur möglich. So lassen sich beispielsweise bei Tunnelbauwerken sämtliche Gewölbedrainagen «kurzschliessen», d.h. die Querverbindungen in die Hauptentwässerungsleitung werden ganz oder teilweise verschlossen (Notfallentlastung). In die Schächte der Gewölbedrainage können dazu auch Passstücke eingesetzt werden, die bei «Starkwasseranfall» die weitergeleitete Wassermenge von selbst regulieren.

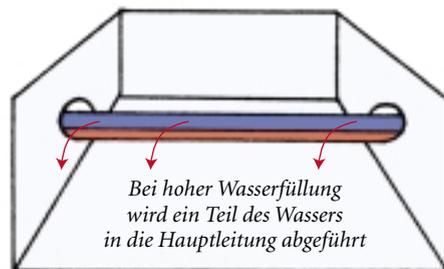


Abb. 14: Kurzschliessen der Gewölbedrainage.

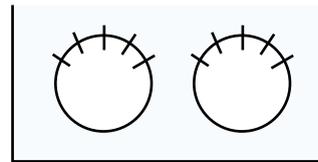
- Falls Ihr Bauwerk zwei nebeneinanderliegende Drainagerohre in der Sohle besitzt, verschliessen Sie eines davon (vgl. Abb. 15).

- Die Ablagerungen in einem Rohr \neq Summe der Ablagerungen beider Rohre, sondern

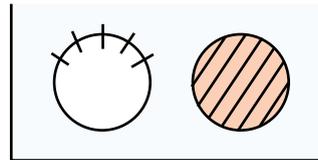
$$= \left[\frac{\sqrt{A_1}}{2} + \frac{\sqrt{A_2}}{2} \right]^2$$

Zudem reduzieren sich die normalen Spülkosten (Schlamm) um 60–70%. Falls die anfallende Wassermenge im Laufe der Zeit stark abnimmt (Verdacht auf verstopfte Sickerlöcher), kann das 2. Rohr jederzeit wieder in Betrieb genommen werden.

- Bei stark kalkübersättigtem Bergwasser muss geprüft werden, ob die Zugabe von



Wasserführung gering bis mittel



Deckelverschluss

Abb. 15: Falls es die Wassermengen erlauben, nehmen Sie ein Drainagerohr ausser Betrieb.

Versinterungen – Erscheinungsformen



Bereits während der Bauphase entstehen starke Ablagerungen durch die pH-Wert-Erhöhungen des Bergwassers. Beide Aufnahmen stammen aus dem Kanton Graubünden.



Weiche Ablagerungen im EW-Schacht des A3-Bözbergtunnels. Durch die Zugabe von Härtestabilisatoren bilden sich feine weiche Kalkschichten. Eines der beiden EW-Rohre könnte wegen der geringen Wassermenge verschlossen werden.



Rigole eines öffentlichen Parkhauses in Engelberg.



Ganz links: sehr harte Ablagerungen aus dem Furka-Basistunnel. Mitte: «Spritzbetonablagerungen» aus dem Crapteigtunnel. Rechts: harte, Ablagerung aus dem CO₂-haltigen Bergwasser des Isla Bella-Tunnels.



Ablagerung im Belchentunnel durch «normales» kalkhaltiges Jurawasser.



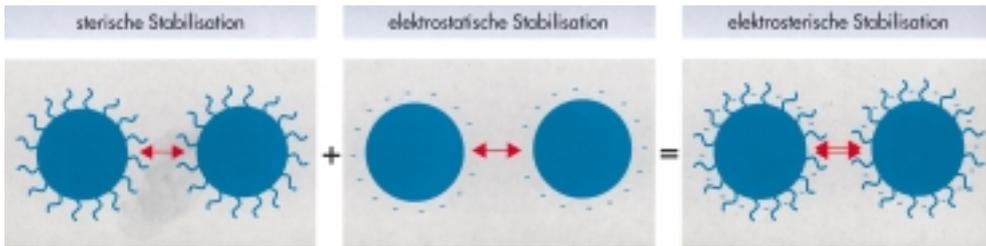
Ablagerung im Belchentunnel durch Kalkmilch.



Starke Versinterungsbildung im SBB-Adlertunnel. Der ausgefallene Kalkschlamm ist weich, wird aber mit der Zeit hart.



Versickerungsschacht im neuen Adlertunnel (Tagbaustrecke). Die Funktionstüchtigkeit geht bereits nach kurzer Zeit verloren.



Die langkettigen Härtestabilisatoren lagern sich an die wachsenden Kalkkristalle an und verhindern dadurch deren Zusammenwachsen.

Die Härtestabilisatoren erhöhen die negative Oberflächenladung der Kalkkristalle und bestimmen dadurch eine verstärkte Abstossung der Partikel.

Durch die gezielte Kombination beider Mechanismen der Härtestabilisatoren lassen sich alle bekannten Grund- und Sickerwässer wirksam behandeln.

schwach mineralisiertem Wasser (z.B. Flüsse, Bäche) zu Beginn des Entwässerungssystems nicht möglich ist (ausgeführte Lösung für den Zugwaldtunnel der RhB).

Wasserbehandlungsverfahren – Schutzmöglichkeit für das primäre und sekundäre Entwässerungssystem

Ablagerungen können sich sowohl im primären Entwässerungssystem als auch im sekundären Entwässerungssystem bilden.

Primäres Entwässerungssystem:

Das primäre Entwässerungssystem beinhaltet alle Bauteile, die nach dem Bau nicht mehr zugänglich sind und die Aufgabe haben, das anfallende Bergwasser aus dem Gebirge zu fassen und dem sekundären Entwässerungssystem zuzuführen. Dazu gehören: Vliese, Drainagematten, Noppenfolien, Sickerpackungen, Drainagebohrungen usw.

Sekundäres Entwässerungssystem:

Das sekundäre Entwässerungssystem beinhaltet alle Bauteile, die nach dem Bau unterhalten werden können. Dazu gehören Sickerleitungen, Entwässerungsrohre, Schächte usw.

Um die Entwässerungsrohre und -leitungen frei von Ablagerungen zu halten, bedarf es regelmässiger Unterhaltsarbeiten. Die Kosten dieser «Spülaktionen» können einen

grossen Teil an den gesamten Unterhaltskosten ausmachen. Zudem beeinflussen die Unterhaltsarbeiten die Lebensdauer des Entwässerungssystems negativ. Als Alternative zu den konventionellen Unterhaltsverfahren wie Spülen, Fräsen usw. bietet sich nun auch das Verfahren der Härtestabilisation an.

Durch die Zugabe von Härtestabilisatoren (sogenannte Konditionierungsmittel) zum Bergwasser wird verhindert, dass die gelösten Wasserinhaltsstoffe ausfallen und zu Ablagerungen führen.

Die wachsenden Kalkkristalle werden einerseits in ihrem Wachstum gestört (sterische Stabilisation) und andererseits führt die elektrostatistische Stabilisation zu einer erhöhten Dispergierbarkeit der Kristalle untereinander, wodurch die deformierten Kristallkeime mit dem Bergwasser aus dem Bauwerk geschwemmt werden.

Bei hohen Fliessgeschwindigkeiten des Bergwassers im Entwässerungssystem werden in der Regel sämtliche Kristallkeime und Feinanteile aus dem Bauwerk geschwemmt. Durch den Einsatz der Härtestabilisation entfallen hier auch die einfachen Spülungen zum Entfernen des Feinmaterials aus den Leitungen.

Bei kleinen Fliessgeschwindigkeiten lagert sich ein Teil der deformierten Kalkkristalle in den Rohrsohlen ab (der Rest wird weggeschwemmt). Die dabei entstehenden Ablagerungen sind weich und lassen sich mit hohen Reinigungsgeschwindigkeiten entfernen.

Der Härtestabilisator kann in flüssiger (Härtestabilisationsanlage) oder in fester

Form (Depotsteine) eingesetzt werden. Dabei reagiert der Stabilisator mit dem gelösten Kalk nicht chemisch (Stoffumwandlung), sondern ausschliesslich physikalisch (Veränderung des Aggregatzustandes).

Als Härtestabilisatoren für die Anlagen kommen in Betracht:

Polykarbonate, Citronensäuren und Polyamide mit guter bis sehr guter biologischer Abbaubarkeit.

Als Depotsteine bezeichnet man ein Produkt, das aus Härtestabilisator und/oder Dispergator in fester Form und einer geeigneten Trägersubstanz besteht. Die Form, Grösse und Auflösengeschwindigkeit der Steine kann nach Wunsch bestimmt werden. Als Härtestabilisatoren für die Depotsteine eignen sich die folgenden Mittel:

• *Polycarbonsäuren:*

Geeignetes Grundmaterial, das sich gut verarbeiten lässt. Biologische Abbaubarkeit gut. Gute Stabilisierwirkung.

• *Dehydrierte Polyamide:*

Sehr guter Wirkstoff. In destilliertem Wasser sind die Steine unlöslich ($< 0,1$ ppm). Erst durch den Kontakt der Steine mit dem Kalk des Bergwassers entsteht der Stabilisator (durch Hydrolyse). Dabei wird laufend nur so viel an Härtestabilisator produziert, wie zur Verhinderung der Kalkablagerungen notwendig ist. Der Ausgangsstoff wird von Bakterien nicht abgebaut, erst der durch Hydrolyse entstehende Härtestabilisator ist biologisch abbaubar. Besonders geeignet bei hohen pH-Werten (10–13) und zementbedingten Ablagerungen.

Die Anwendungsmöglichkeiten von Depotsteinen sind vielfältig. Die Steine lassen sich sowohl in primären (Vlies, Sickerpackung usw.) wie auch in sekundären Entwässerungssystemen einsetzen (Drainagebohrungen, Sickerleitungen...).

Einsatzmöglichkeiten für Depotsteine

- Sickerpackungen der Gewölbedrainagen
- Schächte eines EWS
- Drainagebohrungen

Die Steine können in die Sickerpackung von Drainageleitungen eingebaut werden. Durch den Kontakt des anfallenden Bergwassers mit den Steinen bildet sich der Härtestabilisator durch Hydrolyse auf der Steinoberfläche. Der Härtestabilisator mischt sich zum Bergwasser und verhindert so die Bildung von Karbonatablagerungen. Die Lebensdauer der Steine kann angepasst werden und richtet sich nach

- pH-Wert
- Wasseranfall
- Temperatur des Bergwassers.

Eine durchschnittliche Lebensdauer der Depotsteine in den Sickerpackungen von 4 bis 5 Jahren scheint vernünftig, denn in dieser Zeitperiode ist die Versinterungsbildung als Folge der Betonauswaschung (Spritzbeton, Injektionen) am stärksten. Da ein Nachfüllen der Depotsteine in den Sickerpackungen in der Regel aufwendig ist (schlechte Zugänglichkeit), empfiehlt es sich, die einzubauende Menge angemessen anzusetzen. Die zurzeit eingebauten Depotsteinmengen variieren zwischen 0,5–1 kg je Laufmeter Sickerleitung und 1–3 kg für den gesamten Tunnelquerschnitt.

Gute Einsatzgebiete bilden feingliedrige Entwässerungssysteme. Dort, wo Sicker- und

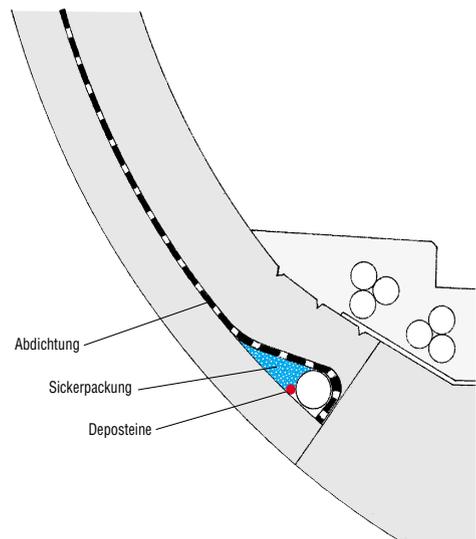


Abb. 16: Einbau von Depotsteinen in die Sickerpackungen.

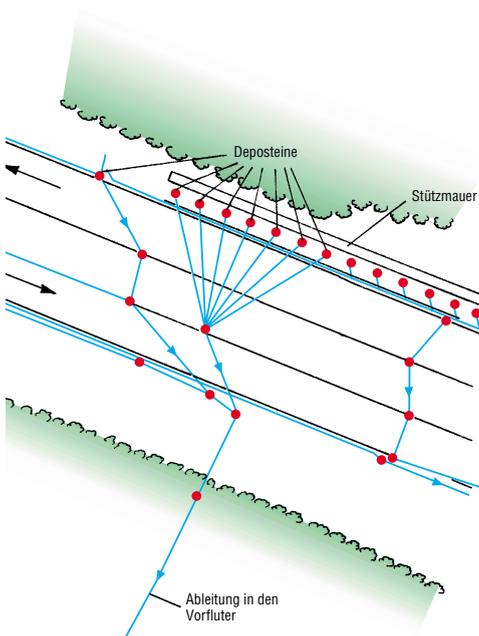


Abb. 17: Hangentwässerungsanlage.

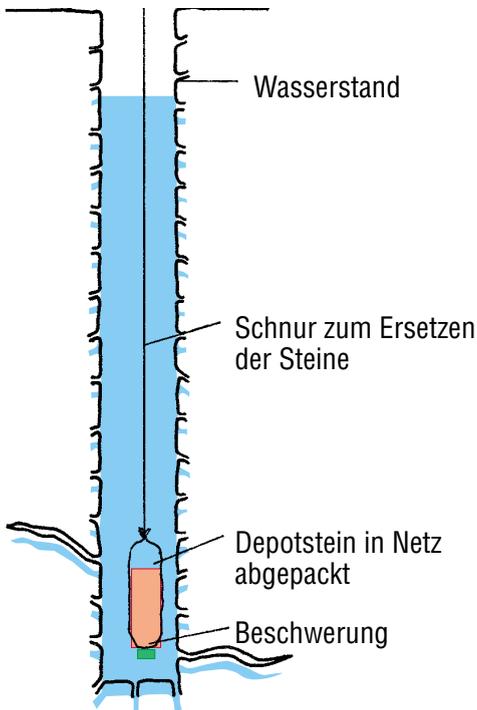
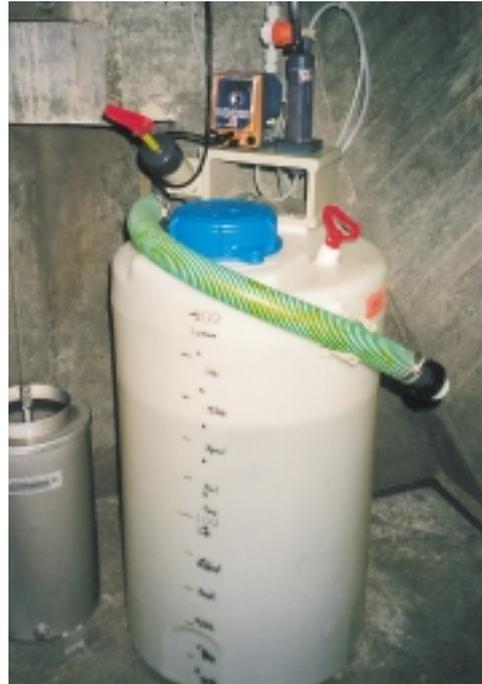


Abb. 18: Drainagebohrung mit Depotstein.

Drainageleitungen nicht immer konstant Wasser führen und sogar teilweise trocken liegen, eignet sich die konstante Dosierung von flüssigen Härtestabilisatoren nicht. Hier eignen sich Steine, deren Form und Größe den Bedürfnissen angepasst werden können.

Als drittes Beispiel eine Drainagebohrung. Drainagebohrungen sind oftmals die letzte Möglichkeit, einen ungewollten Wasserdruck auf ein Bauwerksteil zu reduzieren. Drainagebohrungen während des Baus helfen die Wasserwirksamkeit zu erhöhen und sind in jedem Fall zu begrüßen. In der Regel reduziert sich die anfallende Berg-

Härtestabilisationsanlagen, einige Beispiele



Einfache Anlage

Dosieranlage zur Härtestabilisation mit einer einzelnen Dosierpumpe. Da bei diesem Bauwerk (Stau-mauer Panix) der Verbrauch an Stabilisator sehr gering ist (ca. 10 kg / Jahr), wird das Mittel vorgängig mit Wasser verdünnt. Dadurch wird die Dosierung und Durchmischung des Mittels mit dem Bergwasser verbessert. Die Anlage ist mobil und eignet sich deshalb besonders gut für Baustelleneinsätze. Vorratsbehälter reicht für mehrere Jahre.

Normallösung



*Strassentunnel + Bahntunnel
Härtstabilisationsanlage mit 2 Dosierpumpen im Tunnel Regrouillon im Kanton Wallis. Durch geschickte Standortwahl kann der Installationsaufwand (Verlegen der Leitungen) minimiert werden. Die Anlage ist robust, wartungsarm und bietet ausreichende Betriebssicherheit. Vorratsbehälter reicht für ca. 2 Jahre.*



Hohe Betriebssicherheit



*Autobahntunnel
Härtstabilisationsanlage im Tunnel Quarten der A3. Die beiden Dosierpumpen (Typ LEWA) arbeiten sehr präzise, beinahe wartungsfrei, und über die Steuerung (Kasten) können Betriebsstörungen direkt an die Zentrale (Werkhof) gemeldet werden. Anlage mit hohen Anforderungen an die Betriebssicherheit. Vorratsbehälter reicht für ca. 2 Jahre.*

*Hohe Betriebssicherheit
Robust – erweiterbar*



*Eisenbahntunnel
Anlage im Simplontunnel mit 1 Dosierpumpe. Wegen der hohen Zuggeschwindigkeiten musste die Anlage im Boden verankert werden (Betonplatte). Vorratsbehälter reicht hier ebenfalls für ca. 1½ Jahre. Die Anlage kann mit zusätzlichen Pumpen nachgerüstet werden.*

wassermenge wegen der sich bildenden Versinterungen, sodass Nachbohrungen durchgeführt werden müssen. Dies lässt sich verhindern.

Berechnung des jährlichen Verbrauches an Depotsteinen

Verbrauch in kg = $Q[\text{l}/\text{min}] \cdot 1,67$

Bsp: Bohrloch bringt $Q = 1,5 \text{ l}/\text{min}$

⇒ Jahresbedarf an DPS 2,5 kg

z.B. Auslegen $2 \times 1,25 \text{ kg}$ pro Jahr

Versinterungsbildung – Versinterungsverhinderung

Literaturnachweis und -verzeichnis

EMPA (1993): Wasserhaushalt von Bauwerken –
Schlussbericht; Untersuchungsbericht EMPA;
Dübendorf.

Held H.D. (Neu bearbeitet von G. Bohnsack),
(1984): Kühlwasser 3. überarbeitete und er-
weiterte Auflage; Essen (Vulkan Verlag Dr. W.
Classen).

Folgerungen und Empfehlungen für Neubauten und Sanierungsprojekte

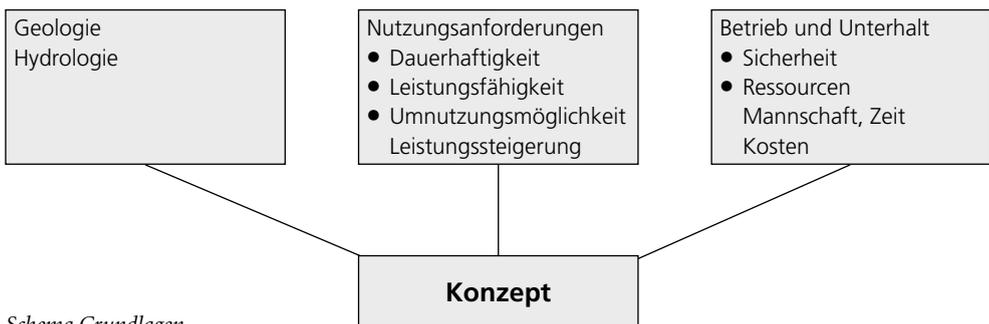
Die Grundlagen

Damit ein Bauwerk optimal projektiert und erstellt werden kann, müssen die Grundlagen sorgfältig erarbeitet werden. Diese Aufgabe stellt sich nicht allein für den Geologen, sondern fällt zunehmend in den Bereich des Bauherrn, des Bauingenieurs und besonders wichtig in jenen des Unterhaltschefs. Idealerweise werden die Daten im Team erarbeitet, wobei der offene Informationsaustausch an Sitzungen hartnäckig durchgesetzt werden muss. Bereits in dieser Phase muss das Team gezielt und straff geführt werden, wobei diese Aufgabe nur durch den Bauherrn oder dessen Vertreter erfüllt werden kann. Im Bedarfsfall sollen Spezialisten beigezogen werden. Oft wird auf den Einsatz dieser Spezialisten verzichtet, aus Furcht, deren Ergebnisse würden zu weiteren Komplikationen, Umprojektierungen und Mehrkosten führen, deshalb muss deren Aufgabe vorgängig klar und präzis definiert werden. Bei schwierigen Fragestellungen wird man aber früher oder später auf deren Hilfe angewiesen sein, und während der Startphase können Projektänderungen leichter einfließen. Die wichtigsten Grundlagen sind (Schema Grundlagen):

Bei der Erarbeitung der hydrologischen Grunddaten muss das Gewicht stärker als bisher beim Chemismus des Bergwassers liegen und nicht wie bisher fast ausschliesslich bei den Wassermengen. Die Wasserinhaltsstoffe sind mit ihren Schwankungsbereichen anzugeben. Noch wichtiger sind die Angaben über das Versinterungsverhalten des Bergwassers, denn sie liefern die Daten zur Gestaltung des primären und an zweiter Stelle des sekundären Entwässerungssystems.

Nachfolgend ein Vorschlag zur Erfassung der hydrogeologischen Grunddaten

1. Längsprofil mit Angaben zu Gesteinsformationen, Geologie, Ausbruchsklassen, Festigkeiten, Klüften...
2. Angaben zum Wasserhaushalt
 - Initialer Wasseranfall während des Vortriebs, min./max./wahrscheinlicher Wasseranfall
 - Wasseranfall nach 10 Jahren
 - Wasserdruck bzw. Bergwasserspiegel vor und nach dem Bau
 - Drainagewirkung auf die Umgebung
3. Temperaturen der Felsoberfläche während des Baus, während des Betriebs
4. Gasführung: Methangas, Schwefelwasserstoff, CO₂



Schema Grundlagen

Muster eines Tunnelängenprofils mit relevanten Bergwasserangaben

Längenprofil mit folgenden Angaben ergänzt:

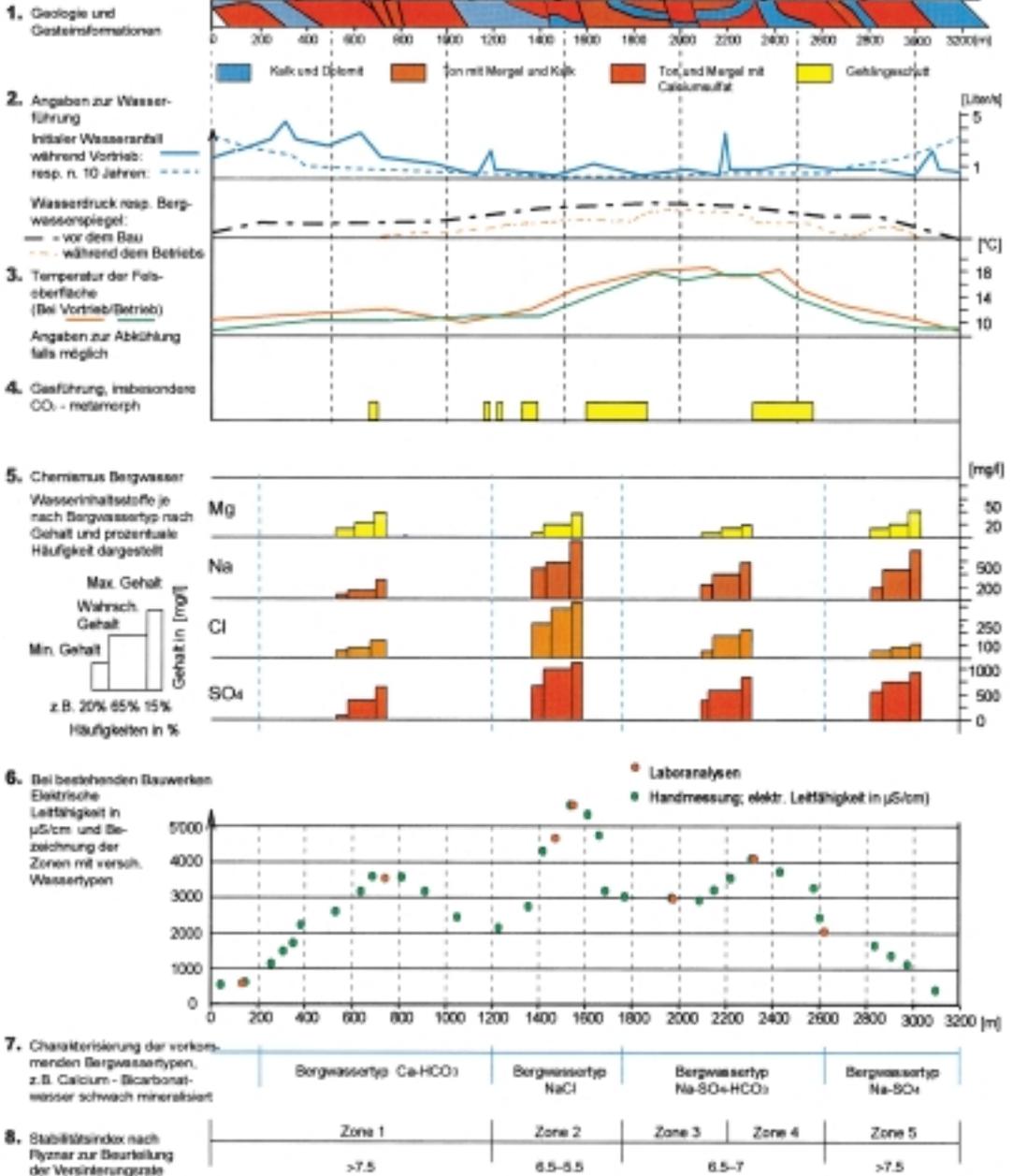


Abb. 1: Erfassung der hydrologischen Grunddaten. Besonders wichtig die Punkte 2, 5 und 8!

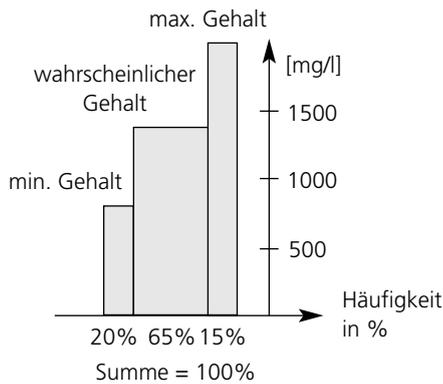


Abb. 1: Darstellungsmöglichkeit für wichtige Wasserinhaltsstoffe.

5. Chemismus Bergwasser: Angaben zu Mg, Na, Cl, SO₄, Ca, HCO₃...

6. Messwerte der elektrischen Leitfähigkeit des Bergwassers als Gradmesser für den Salzgehalt (nur für bestehende Bauwerke)

7. Charakterisierung des Bergwassertyps für jede geologische Zone (1 bis X)

8. Stabilitätsindex nach Ryznar zur Berechnung der Versinterungsrate und des notwendigen Versinterungshohlraums

Die im Rahmen der Forschungsarbeit festgestellten Schäden an der Rohbaustuktur

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden die nachfolgend beschriebenen Schäden

Schäden an der Rohbaustuktur

Schäden an Spritzbeton und/oder Massivbeton d < 0,2 m	
AAR-Reaktion	durch die Verwendung von ungeeigneten Zuschlagstoffen. Betroffen sind davon Fertigbetonelemente beim Tunnel Quarten der A3.
lösender Angriff	durch CO ₂ -haltiges Bergwasser. Betroffen davon ist ein Schrägschacht der Kraftwerke St. Moritz (Druckschacht).
treibender Angriff	durch Thaumasit, Ettringit und Gipsbildung (Thaumasit im Vordergrund). Ange troffen in den SBB-Bauwerken Oberer Hauensteintunnel, Hauenstein-Basistunnel, Bözbergtunnel, Riesbachtunnel, Liesbergtunnel und vielen mehr.
Chloridkorrosion	durch Streusalze des Strassenunterhalts, die in den Bereich des SBB-Rosenbergtunnels vordringen. Hohe Chloridkonzentrationen beim Autobahntunnel A3 Bözberg (bisher keine Korrosion) und beim benachbarten SBB-Bözbergtunnel. Im Bahntunnel sind die Entwässerungsschächte deshalb ohne Armierung gefertigt. Hohe Chloridwerte in der Zwischendecke des Belchentunnels (Anreicherung durch Verdunstung).
Mikrobiologie	durch sulfatreduzierende Bakterien im Sondierstollen Kandertal.
Salzsprengeung	der Spritzbetonschale durch Natriumsulfat im Oberen Hauensteintunnel.
Risse	und partielle Niederbrüche der Betonverkleidung im Stollen Peil-Wanna (Gewölbebeton) und an der Spritzbetonschale im Oberen Hauensteintunnel.

Schäden am Abdichtungssystem	
Perforation Faltenbildung Systemfehler	An dieser Stelle möchten wir auf die Veröffentlichung von Hr. P. Zwicky hinweisen, der auf diesem Gebiet mit Sicherheit über die grösste Erfahrung und die umfassendsten Kenntnisse verfügt.
Chem. Zersetzung	20 Jahre alte PVC-Folie aus der Zwischendecke des Belchentunnels zeigt keine nennenswerten Veränderungen auf. Die im gleichen Tunnel ohne Vlies eingebaute 35 Jahre alte PVC-Folie (1 mm) zwischen Spritzbeton und Innenring weist einen relativ hohen Weichmacherverlust auf (Versteifung), kann aber im Zuge der laufenden Sanierungsarbeiten mit neuen PVC-Folien verschweisst werden. Der hohe Weichmacherverlust ist u.a. auf die damalige Rezeptur zurückzuführen und darf keinesfalls zu Rückschlüssen für heutige PVC-Rezepturen verwendet werden.

Schäden am Massivbeton d > 0,2 m	
AAR-Reaktion	durch die Verwendung von ungeeigneten Zuschlagstoffen. Freisiegelstollen Fisetenbach-Hintersand der Kraftwerke Linth-Limmern AG.
lösender Angriff	durch CO ₂ -haltiges Bergwasser und Schwefelwasserstoff in der Rigole des Zugwaldtunnels. Nach dem Auffahren des Gotschnatunnels in unmittelbarer Umgebung verringerte sich der Zufluss von stark mineralisiertem Bergwasser für den Zugwaldtunnel massiv, sodass die Korrosion zum Stillstand kam.
treibender Angriff	durch Thaumazit und Ettringit und/oder Gipsbildung. Bei vielen Stellen im San Bernardino-Strassentunnel.
Chloridkorrosion	Spritzwasserbereich vieler Kunstbauten. In einem Parkhaus in Zürich führte stehendes Tropfwasser zu massiver Stahlkorrosion im tieferliegenden Geschoss (Heizzentrale).
Druckschäden	Sohlhebungen durch Quelldruck in vielen Bahntunnels (Hauensteintunnels, Bözbergtunnel) und beim Belchen-Autobahntunnel. Sohlhebungen durch Wasserdruck (als Folge fehlender oder defekter Entwässerungssysteme) in vielen Freisiegelstollen (Sohlplatten gebrochen) und Strassentunnel (Rofla).

Schäden an Natursteinen und/oder Fugenmörtel (Kalk- oder Zementmörtel)	
Salzsprengrung	durch Natriumsalze. Durch den jahrelangen gleichgerichteten Feuchtigkeitsstrom findet eine Salzanreicherung in den Fugen statt. Davon betroffen sind fast alle Bahntunnels. Bei Natursteinen führt der gleiche Mechanismus zu Sprengschäden in den bodennahen Bereichen. Die Mechanismen der Salzanreicherung wurden durch das Institut für Denkmalpflege der ETH Zürich eingehend untersucht und veröffentlicht.
treibender Angriff	durch sulfathaltiges Bergwasser, kann in seltenen Fällen ebenfalls bei Mörtelfugen beobachtet werden.

in Untertagebauwerken festgestellt und untersucht.

Schäden am Drainage- und Entwässerungssystem

Die mit Abstand häufigsten Schäden bei Untertagebauwerken betreffen die Drainage- und Entwässerungssysteme. Die Liste der betroffenen Bauwerke ist lang und kann in den benachbarten Ländern (D, A, I, F) mit zum Teil noch grösserer Häufigkeit weiterverfolgt werden. Die Mehrzahl der eingangs beschriebenen Schäden an Spritzbetonschalen, Massivbeton und Abdichtungssystemen sind eine direkte Folge ungenügender Entwässerungssysteme. Die Liste der Schadensursachen ungenügender Entwässerungssysteme ist gross.

Die Ausbildung eines funktionstüchtigen Entwässerungssystems ist der einfachste und kostengünstigste Weg, um die geforderte Lebensdauer eines Bauwerks ohne Einschränkung zu erreichen (Abb. 1, S.135).

Nachweis der Dauerhaftigkeit der Rohbaustruktur

Im folgenden Abschnitt wird beschrieben, wie eine optimale Dauerhaftigkeit erreicht werden kann.

Nachweis der Dauerhaftigkeit für Beton/ Spritzbeton/Fugenmörtel/ Natursteine

Bisher hat sich der Geologe/Bauingenieur darauf beschränkt, die Aggressivität des zu erwartenden Bergwassers anhand der bestehenden DIN-Norm 4030 zu beurteilen. Dazu wurde das zu erwartende Bergwasser mittels

- Daten aus benachbarten Bauwerken
- anzutreffenden Gesteinsformationen
- Sondierbohrungen eingegrenzt.

Zur besseren Bestimmung und Eingrenzung des Bergwassers empfehlen sich zwei zusätzliche Massnahmen:

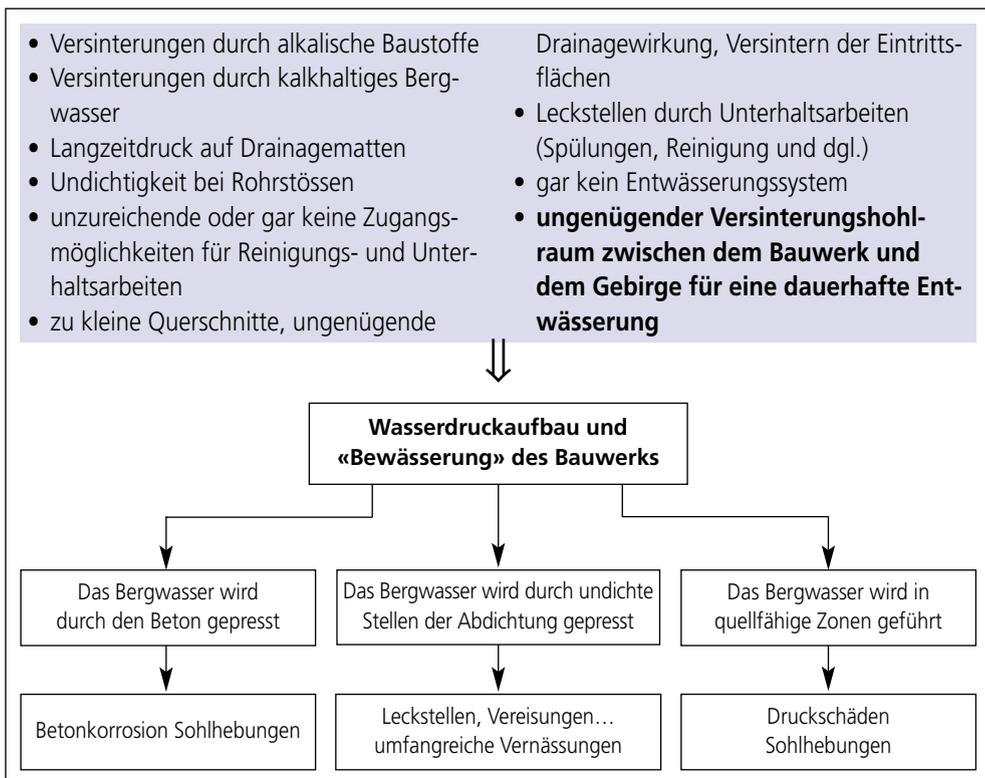


Abb. 1: Schäden an Drainage- und Entwässerungssystemen und ihre Folgen.

- Begehung benachbarter Bauwerke und Messung der elektrischen Leitfähigkeit vor Ort. Dadurch lassen sich lokal auftretende, stark mineralisierte Bergwässer in Kürze identifizieren.

- Man vergleiche die Daten mit der Mineralwasserkarte der Schweiz im Anhang des Buches. Die Karte gibt zusätzliche Hinweise zur Beschaffenheit des anzutreffenden Bergwassers.

Hat man den ungefähren Charakter des Bergwassers in den einzelnen Zonen bestimmt, folgt der zweite Schritt: die Beurteilung der Aggressivität. Als Basis dient dabei, wie bisher, die DIN-Norm 4030 in abgeänderter und erweiterter Form auf Seite 136.

Gegenüber der bestehenden DIN-Norm 4030 wurden ein paar neue Aspekte berücksichtigt:

- CO₂-haltige Bergwässer sind in Kombination mit Sulfaten besonders stark aggressiv!

- Dünne Betonbauteile mit gleichgerichtetem Feuchtigkeitsstrom führen zu hohen Sulfatkonzentrationen im Bauteil selbst und an der Kontaktgrenze zum Fels (Siebeffekt durch Verdunstung). Das ursprüngliche Bergwasser wird dadurch um ein Mehrfaches aggressiver. Die Korrosion findet dabei nicht nur an der Kontaktfläche Bauteil-Fels statt, sondern im ganzen Bauteil gleichzeitig. Die bis heute üblichen Laborversuche beschränken sich demgegenüber darauf, Betonprismen in Sulfatlösungen zu tauchen und die dabei auftretenden Veränderungen zu erfassen. Dabei findet der Angriff nur auf der Oberfläche, via Diffusion, statt. Ein «dynamischer» Angriff, der den ganzen Materialquerschnitt erfasst, wie beispielsweise durch einseitigen Wasserdruck, wird nicht berücksichtigt.

- Fugenmörtel werden nicht «ausgewaschen», sondern durch Mineralsalzsprengung im Laufe der Zeit abgetragen.

Beurteilung der Bergwasseraggressivität auf Stahlbetonteile mit Bauteildicke $d > 0,2$ m			
	Angriff schwach	Angriff stark	Angriff sehr stark
kalklösende Kohlensäure (CO ₂) [mg/l] (Heyer) und/oder pH-Wert falls el. Leitf. [μ S/cm] < 2500	15 bis 40 und/oder 6,5 bis 5,5	40 bis 100 und/oder 5,5 bis 4,5	> 100 und/oder < 4,5
kalklösende Kohlensäure (CO ₂) [mg/l] (Heyer) und/oder pH-Wert falls el. Leitf. [μ S/cm] > 2500 bei hohem Wasseranfall	10 bis 20 und/oder bis 6,5	20 bis 50 und/oder 6,5 bis 5,5	> 50 und/oder < 5,5
Gehalt an SO ₄ falls pH-Wert > 6,5 und CO ₂ aggr. < 25 mg/l	200 bis 600	600 bis 3000	> 3000
Gehalt an SO ₄ falls pH-Wert < 6,5 und/oder CO ₂ aggr. > 25 mg/l	100 bis 300	300 bis 1500	> 1500
Gehalt an SO ₄ falls Mg > 100 mg/l	150 bis 400	400 bis 2000	> 2000
Cl	100 bis 500	500 bis 2500	> 2500

Grenzwerte der Bergwasseraggressivität auf Stahlbetonbauteile mit Bauteildicke $d < 0,2$ m und gleichgerichtetem Feuchtigkeitsstrom (beispielsweise Spritzbetonschalen)			
	Angriff schwach	Angriff stark	Angriff sehr stark
SO ₄ -Gehalt	bis 200	200 bis 1000	> 1000
SO ₄ -Gehalt falls Mg > 50 [mg/l]	bis 100	100 bis 500	> 500
Cl-Gehalt	bis 50	50 bis 200	> 200

Fugenmörtel von Natursteinmauerwerk bei gleichgerichtetem Feuchtigkeitsstrom			
	Angriff schwach	Angriff stark	Angriff sehr stark
Na ₂ SO ₄ + Na(HCO ₃) + NaCO ₃	bis 150	150 bis 1000	> 1000

Ablagerungsbildung (Kalk) im primären und sekundären Entwässerungssystem			
	keine Ablagerungen	deutliche Ablagerungen	starke Ablagerungen
für Bergwasser mit $5 < \text{pH-Wert} < 10$ Stabilitätsindex SI nach Ryznar	> 7,5	7,5–6	< 6

Tab. 2: DIN-Norm 4030 in abgeänderter und erweiterter Form.

- Die Versinterungsneigung des Bergwassers muss eingegrenzt werden, um die Versinterungsrate des Bergwassers zu bestimmen und so den notwendigen Versinterungshohlraum berechnen und projektieren zu können.

Bei den Empfehlungen zum Schutz der Bauteile können wir neben den bereits üblichen Massnahmen wie Schutzanstrich oder Vollabdichtungen ein paar Vorschläge machen.

- Dicke, massige Bauteile mit einer mittleren bis guten Qualität sind besser als dünne Bauteile in Spitzenqualität, denn einerseits erhöht sich dadurch die gesamte Zementmenge des Bauteils und andererseits reduziert sich dadurch gleichzeitig der Wassertransport durch das Bauteil. Der erste Faktor führt zu einer längeren Korrosionszeit, bis der Schaden eintritt, und der zweite Faktor reduziert die Korrosionsgeschwindigkeit.

- Spritzbetonschalen werden in der Regel ohne Trennschichten direkt auf den Untergrund, sei dies nun Fels oder Natursteinmauerwerk, appliziert. In wasserführenden Zonen entstehen dadurch immer Probleme, denn

- durch den intensiveren Kontakt wird der Spritzbeton ausgewaschen und es bilden sich die bekannten weissen Ablagerungen.

- das Bergwasser wird durch die Schale gepresst. Die Mineralsalze reichern sich zwischen der Spritzbetonschale und dem Fels an und führen zu Korrosion.

Was bieten sich für Alternativen?

- Der Einbau einer Abdichtungsfolie zwischen Fels und Spritzbetonschale ist zwar eine gute, aber teure Lösung.

- Flüssigfolien auf der Innenseite der Spritzbetonschale sind schwierig zu applizieren, und die langfristige Dauerhaftigkeit (Frost und Wasserdruck) ist noch nicht bekannt.

- Systematische Bohrungen als Drainagesystem in der Spritzbetonschale sind zwar möglich, aber die Wassereintritte müssen auf der Innenseite gefasst und abgeleitet werden. Der Erfolg ist wegen der hohen Versinterungsrate des Bergwassers auf die Dauer unsicher.

- Der Einbau einer einfachen, robusten Drainagematte zwischen dem Untergrund

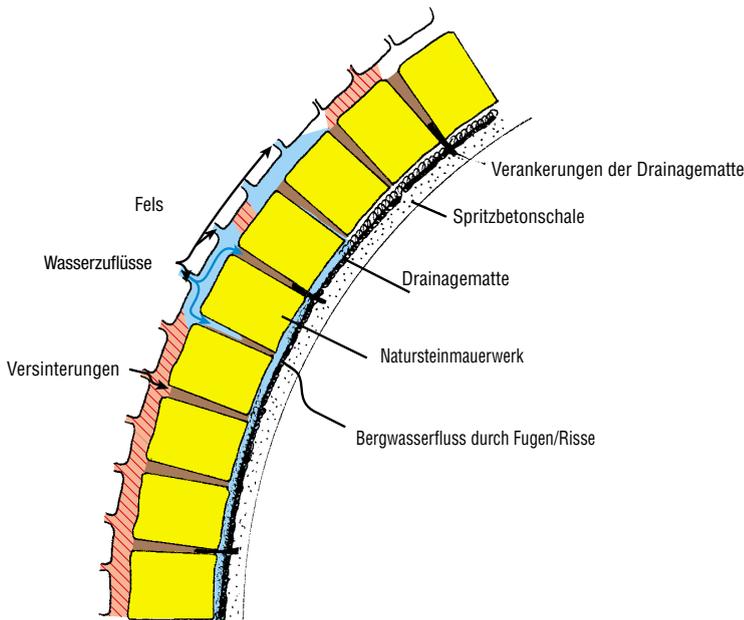


Abb. 2: Alternativer Aufbau einer Spritzbetonabdichtung mit zwischenliegender Drainagematte.

(Fels, Naturstein) und der Spritzbetonschale ist eine denkbare Alternative (vgl. dazu die Abb. 2).

Drainagematte

- Das Bergwasser kann drucklos (!) über die Drainagematte in die Sohle geleitet werden.
- Die Versinterungsrate reduziert sich massiv, da der Kontakt des Bergwassers mit dem Spritzbeton verhindert wird.
- Die Korrosion der Spritzbetonschale findet nicht mehr statt, weil der Feuchtigkeitstransport durch die Schale unterbunden wird.
- Die Spritzbetonschale kann ihre Abdichtungs- und Sicherungsfunktion voll erfüllen.

Nachweis der Dauerhaftigkeit für Abdichtungssysteme

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit konnten die Abdichtungssysteme leider nicht eingehend untersucht werden. Es sei aber auf die laufenden Forschungsarbeiten an der EMPA hingewiesen, die verschiedene Abdichtungssysteme im Hinblick auf ihre Eignung und Verwendungsmöglichkeiten beim Bau beider Basistunnels des Projektes AlpTransit untersuchen und eingehend testen.

Als Nachweise sollen einerseits die bestehenden Normen zu Rate gezogen werden, und andererseits müssen geeignete Rückfallebenen eingeplant werden.

- Bei wasserdruckhaltenden Abdichtun-

gen sind Rückfallebenen (Entlastungsöffnungen oder dgl.) unerlässlich.

- Bei drainierten Abdichtungssystemen genügt die Ausbildung eines funktionstüchtigen Entwässerungssystems.

Nachweis der Dauerhaftigkeit für das Entwässerungssystem

An erster Stelle muss das Funktionsprinzip des Entwässerungssystems erläutert werden. Das Entwässerungssystem kann in zwei Teile gegliedert werden:

A) Primäres EWS

Das primäre Entwässerungssystem beinhaltet alle Bauteile, die nach dem Bau nicht mehr zugänglich sind und deren Aufgabe es ist, das anfallende Bergwasser des Gebirges zu fassen und dem sekundären Entwässerungssystem zuzuführen. Dazu gehören: Flächendrainagen (Vliese, Drainagematten, Sickerpackungen, Noppenbahnen...), Liniendrainagen (Halbschalen...) sowie «Punkt-drainagen» (Bohrungen...).

B) Sekundäres EWS

Das sekundäre Entwässerungssystem beinhaltet alle Bauteile, die nach dem Bau unterhalten werden können. Dazu gehören Sickerleitungen, Entwässerungsröhre, Schächte usw.

Nun verursacht jedes Bergwasser mehr oder weniger Ablagerungen. Im günstigsten Fall handelt es sich dabei um Feinanteile aus dem Gebirge, die durch den Wasserstrom aus dem Bauwerk transportiert werden, im ungünstigsten Fall stösst man auf Kalkmilch (vgl. dazu Fallbeispiel Belchentunnel).

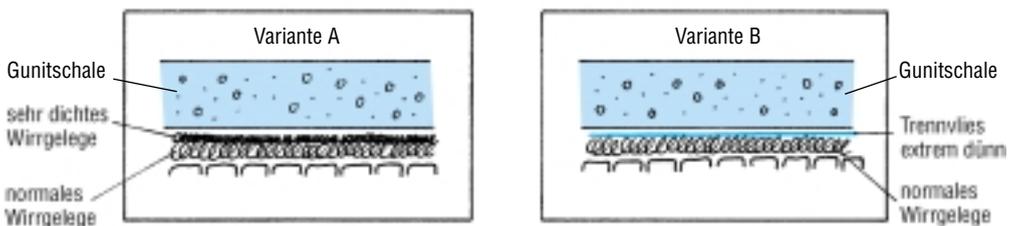
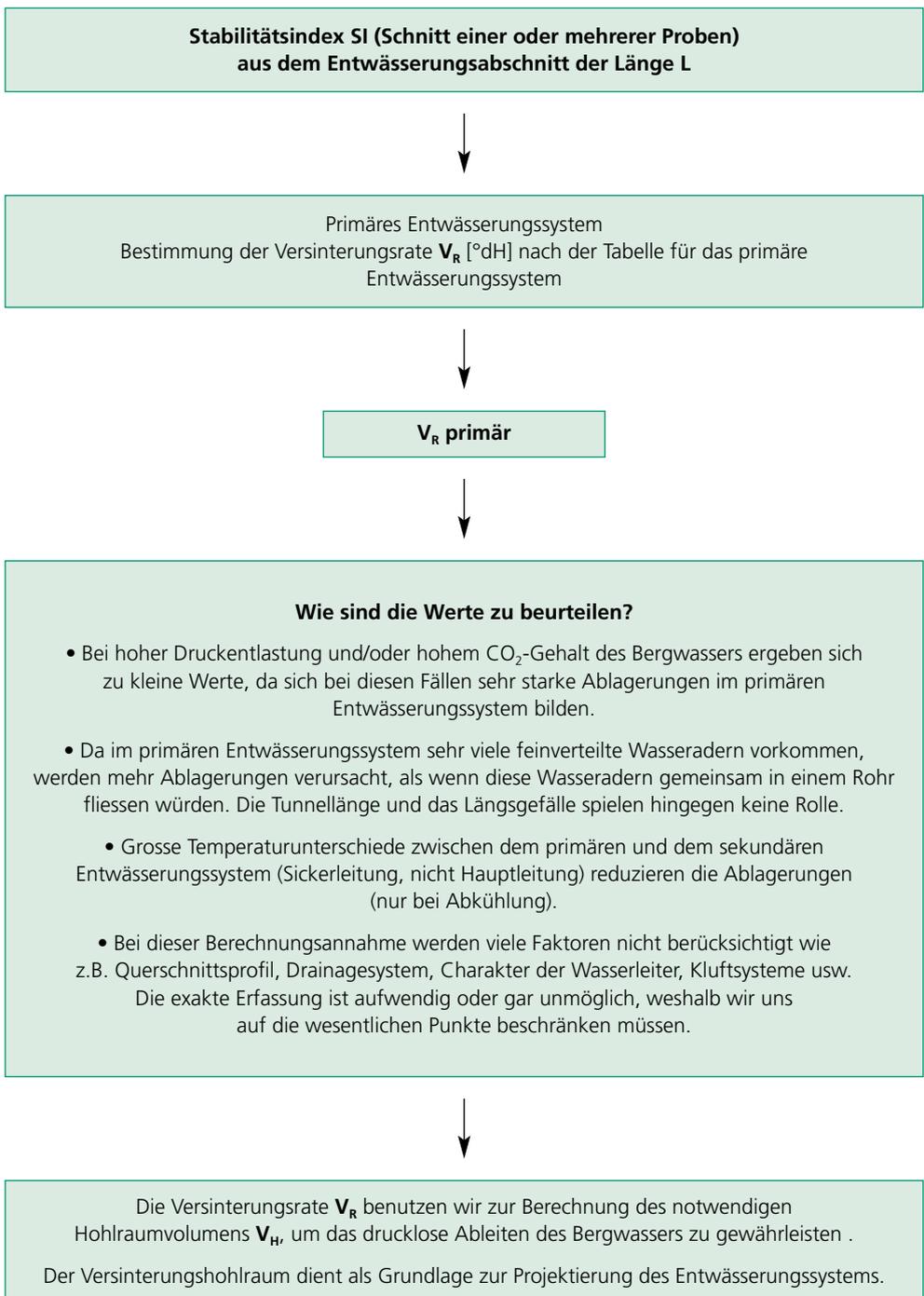


Abb. 3: Einbau von Drainagematte und Gunitzschale. Wie die Drainagematte (z.B. Wirrgelege) im Untergrund verankert werden kann, ist noch offen (Anker, Verbindung mit Armierung). Allenfalls genügen streifenartige Systeme.



Tab. 3: Die Wasserprobenanalysen dienen zur Berechnung des Stabilitätsindex, der wiederum die Basis zur Bestimmung des Versinterungshohlraums liefert. Dieser Hohlraum dient als Grundlage zur Projektierung des EWS.

Ausbildung des primären Entwässerungssystems

Im primären Entwässerungssystem können diese Ablagerungen/Versinterungen nicht entfernt werden. Nun sollte es klar sein, dass wenn man Schäden vermeiden will, die im primären Entwässerungssystem entstehenden Ablagerungen so viel Platz zur Verfügung haben müssen, dass sie sich während der gesamten Lebensdauer des Bauwerks «ungehindert ausbreiten» können. Können sie dies nicht, verändert sich das Bergwasserregime und die Folgen sind in diesem Kapitel beschrieben. Der Platzbedarf zur Aufnahme der Ablagerungen kann mit Versinterungshohlraum « $V_{H(1)}$ » bezeichnet werden. Er lässt sich nicht exakt berechnen, aber relativ gut und einfach abschätzen.

Anhand einer einfachen Rechnung kann der notwendige Versinterungshohlraum abgeschätzt werden, der notwendig ist, um das drucklose Ableiten des Bergwassers während der gesamten Lebensdauer des Bauwerks zu gewährleisten. Anhand des Stabilitätsindex einer oder mehrerer Bergwasserproben kann die Versinterungsrate V_R [°dH] bestimmt werden.

Im Folgenden wollen wir versuchen, die Aussagen anhand von Beispielen zu überprüfen.

Beispiel 1:

Wie gross müsste im Simplontunnel der notwendige Versinterungshohlraum sein, damit die Funktionalität des primären Entwässerungssystems während der gesamten Lebensdauer von 100 Jahren nie gefährdet ist? Die Berechnung soll für die Zone mit den stärksten Ablagerungen durchgeführt werden. Sie befindet sich im Tunnel Ii (Oströhre, im Südabschnitt auf italienischer Seite).

Die Lebensdauer T_B des Bauwerks beträgt 100 Jahre = $3,15 \cdot 10^9$ s.

Die Zone mit den stärksten Ablagerungen misst $L = 1500$ m.

Der durchschnittliche Stabilitätsindex der Wasserproben aus dieser Zone (Schnitt aus drei Proben) SI beträgt 3,6 und stellt damit den tiefsten bekannten Wert dar (in der Schweiz, DE und OE).

1 °dH entspricht 17,8 mg CaCO_3 /l Bergwasser.

Spez. Dichte Dolomit = 2,7 kg/dm³.

Der durchschnittliche Wasseranfall Q in dieser Zone beträgt $Q = 4$ l/s.

Aus der Tabelle ergibt sich V_R [°dH].

$V_R = \text{ca. } 8$ °dH entspricht 142,4 mg CaCO_3 /l.

Der Versinterungshohlraum ergibt sich nun einfach aus

$$V_{H(1)} = \frac{T_B \cdot Q \cdot V_R}{L \cdot \rho}$$

$$V_{H(1)} = \frac{4 \text{ l/s} \cdot 3,15 \cdot 10^9 \text{ s} \cdot 142,4 \text{ mg } \text{CaCO}_3/\text{l}}{1500 \text{ m} \cdot 2700 \text{ g/dm}^3} = 443 \text{ l/m}^3$$

Dieser Wert scheint eher an der unteren Grenze zu sein, denn die Ablagerungsneigung des Bergwassers an dieser Stelle ist enorm. Leider fällt auch in diesem Tunnel das Bergwasser nicht gleichmässig über die Länge L an, sondern tritt in Form von Quellen (bis 40 °C) konzentriert auf. Der notwendige Versinterungshohlraum wächst an dieser Stelle um ein Vielfaches. Es ist deshalb wichtig, die Eigenschaften des Bergwassers während der Bauausführung laufend zu überwachen, um im Bedarfsfall wirkungsvolle Massnahmen ergreifen zu können. Um einen Wasserdruckaufbau an dieser Stelle zu verhindern, sind Spezialkonstruktionen wie voluminöse Quelfassungen notwendig. Der berechnete Versinterungshohlraum von ca.

	keine Ablagerungen	wenig Ablagerungen	mittlere Ablagerungen	starke Ablagerungen	sehr starke Ablagerungen
SI	> 7,5	7,5–7	7–6,5	6,5–5,5	< 5,5
V_R [°dH]	0 °dH	1 °dH	2 °dH	2–5 °dH	5–10 °dH

Tab. 4: Korrelation zwischen Stabilitätsindex SI und Versinterungsrate V_R . SI = Stabilitätsindex nach Ryznar V_R [°dH] = Versinterungsrate des Bergwassers beim Durchströmen des primären Entwässerungssystems. Richtwerte aufgrund von ca. 50 untersuchten Bauwerken in der Schweiz und in Europa.

443 Liter pro Laufmeter Tunnel entspricht in etwa den vor Ort gewonnenen Erfahrungen.

Beispiel 2:

Isla-Bella-Strassentunnel

$$Q = 20 \text{ l/s}$$

$$SI \text{ (Schnitt aus 10 Proben)} = 6,3$$

$$V_R = \text{ca. } 3 \text{ }^\circ\text{dH entspricht } 53,4 \text{ mg CaCO}_3/\text{l}$$

$$\begin{aligned} V_{H[\text{dm}^3]} &= \\ &= \frac{20 \text{ l/s} \cdot 3,15 \cdot 10^9 \text{ s} \cdot 53,4 \text{ mg CaCO}_3/\text{l}}{2000 \text{ m} \cdot 2700 \text{ g/dm}^3} = \\ &= 623 \text{ l/m} \end{aligned}$$

In diesem Bauwerk verteilt sich das anfallende Bergwasser relativ gleichmässig über die Strecke L. Der Versinterungshohlraum von 625 Litern pro Laufmeter Tunnel scheint auch hier vernünftig. Bei diesem Bauwerk befinden wir uns wie überall im Kanton Graubünden im Einzugsgebiet saurer Bergwässer. Dieser Bergwassertyp neigt in Verbindung mit Kalksedimenten und Betonkontakt zu sehr starken Ablagerungen. Fast jedes Untertagebauwerk im Kanton ist davon betroffen. Durch den sauren Charakter des Bergwassers bedingt, reduziert sich der Wasseranfall bei diesen Bauwerken nach der Inbetriebnahme nicht, sondern steigt an. Der Grund dafür liegt darin, dass saures Bergwasser die Gesteinsklüfte nicht schliesst, sondern im ungünstigsten Fall weiter öffnet. In Kalkgebirgen ohne saure Bergwässer kann dagegen mit einer kontinuierlichen Abnahme der Wassermengen gerechnet werden.

Beispiel 3:

Belchentunnel: Vom höchsten Punkt in der Tunnelmitte bis zum Südportal (beide Röhren ohne den Zufluss von Kalkmilch)

$$Q_{\text{Südportal}} = 10 \text{ l/s (beide Tunnelröhren)}$$

$$SI = 6,8 \text{ (Schnitt von 5 Proben)}$$

$$V_R = \text{ca. } 2 \text{ }^\circ\text{dH entspricht } 35,6 \text{ mg CaCO}_3/\text{l}$$

$$\begin{aligned} V_{H[\text{l}]} &= \\ &= \frac{10 \text{ l/s} \cdot 3,15 \cdot 10^9 \text{ s} \cdot 35,6 \text{ mg CaCO}_3/\text{l}}{2 \cdot 1800 \text{ m} \cdot 2700 \text{ g/dm}^3} = \\ &= 115 \text{ l/m} \end{aligned}$$

Der notwendige durchschnittliche Versinterungshohlraum von 115 Litern pro Laufmeter Tunnel scheint bescheiden. Es bestätigt aber die Vermutung, dass es sich bei den Wasserproben um junges, von oben infiltrierendes Bergwasser handelt. Der Wasseranfall ist relativ gleichmässig, beschränkt sich aber auf einzelne wasserführende Zonen. Dies muss bei der Zuteilung des Versinterungshohlraums berücksichtigt werden.

Probleme bereiten dagegen Wasserproben aus den Pumpenschächten der Sickerschlitze. Dort wird das Bergwasser durch die während des Baus erstellten Injektionsschleier stark beeinflusst. Der Stabilitätsindex zeigt hier deutlich tiefere Werte.

$$Q_{\text{Total}} = \text{Durch die Pumpen geförderte Wassermenge aller Sickerschlitze pro Jahr} = 16'500 \text{ m}^3$$

$$n = \text{Anzahl Sickerschlitze in beiden Tunnelröhren} = 28$$

$$SI = 5,3$$

$$V_R \approx 6 \text{ }^\circ\text{dH} - 10 \text{ }^\circ\text{dH entspricht } 140 \text{ mg CaCO}_3/\text{l}$$

$$\begin{aligned} V_{H[\text{dm}^3]} &= \\ &= \frac{16'500 \text{ m}^3 \cdot 140 \text{ mg CaCO}_3/\text{l}}{2700 \text{ g/dm}^3} = \\ &= 855 \text{ l/Jahr} \end{aligned}$$

Das Gesamtvolumen aller Sickerschlitze im Tunnel beträgt $\approx 28 \cdot 3 \text{ m (Höhe)} \cdot 6 \text{ m (Breite der Fahrbahn)} \cdot 0,2 \text{ m (Breite der Sickerschicht)} = 100 \text{ m}^3$.

Damit beträgt das füllbare Porenvolumen der Schlitze ca. $\frac{1}{2} \cdot 100 \text{ m}^3$ und entspricht dem zur Verfügung stehenden Versinterungshohlraum.

Die Berechnung zeigt, dass der zur Verfügung stehende Hohlraum der Sickerschlitze bei gleichbleibendem Wasseranfall in ca. 40 Jahren mit Versinterungen aufgefüllt sein wird und die förderbaren Wassermengen gegen null gehen. Dies entspricht den Beobachtungen vor Ort, denn

- die anfallenden Bergwassermengen in den Sickerschlitzen waren in den ersten Jahren wesentlich grösser und sind in den vergangenen Jahren stetig gesunken.
- die Sickerschlitze mit den stärksten Versinterungen wurden bereits 1989 saniert

(neue Kofferung, Verbreiterung und neue Röhre).

- im Laufe der kommenden Sanierungsarbeiten 2001–2003 sollen alle Sickerschlitze saniert und nochmals verbreitert werden (1 Meter). Dabei erhalten sie eine neue Kofferung und Sickerrohre. Zum Schutz vor Versinterungen werden Depotsteine in die Sickerpackungen eingebaut (Impfwirkung ca. 10 Jahre).

Eine etwa gleich hohe Versinterungsrate dürfte die im Südteil des Tunnels anfallende Kalkmilch aufweisen (100–150 mg CaCO₃/l).

Das Beispiel zeigt, wie wichtig eine differenzierte Betrachtung der Hydrologie ist, damit die notwendigen Massnahmen auch an der richtigen Stelle getroffen werden.

Beispiel 4:

Oberer Hauensteintunnel der SBB: Nordportal bis Südportal (1 Röhre)

$$Q_{\text{Total}} = 35 \text{ l/s (Südportal)}$$

$$SI = 6,2 \text{ (Schnitt aus 4 Proben)}$$

$$V_R = 3 \text{ °dH entspricht } 53 \text{ mg CaCO}_3/\text{l}$$

$$V_{H(l)} = \frac{35 \text{ l/s} \cdot 3,15 \cdot 10^9 \text{ s} \cdot 53 \text{ mg CaCO}_3/\text{l}}{2000 \text{ m} \cdot 2700 \text{ g/dm}^3} = 1083 \text{ l/m}^3$$

Ein durchschnittlicher Versinterungshohlraum von 1083 Litern pro Laufmeter Tunnel scheint auch bei diesem Bauwerk realistisch zu sein. Die hohen Wassermengen, die unter hohem Druck aus der Tiefe aufsteigen, weisen einen sehr hohen Kalkgehalt auf, der zu den zum Teil härtesten Versinterungen führt, die man in Bauwerken finden kann.

Da der Tunnel hinter dem Natursteingewölbe über einen ausreichenden Versinterungshohlraum verfügt, beschränkt sich die Versinterungsproblematik bei diesem Bauwerk auf den Unterhalt des sekundären Entwässerungssystems. Solch starke Ablagerungen können nur durch den Einsatz regelmässiger Spül- und Fräsarbeiten entfernt werden. Als kostengünstige Alternative bietet sich in solchen Fällen die Wasserbehandlung an. Mit dem Verfahren der Härtestabilisierung lassen sich bei diesem Bauwerk die herkömmlichen Spül- und Fräskosten um ca. 75% reduzieren.

Die Beispiele haben gezeigt, in welchen Bandbreiten ein angemessener Versinterungshohlraum in etwa anzusiedeln ist.

Anordnung und Ausbildung des Versinterungshohlraums

Das Ziel des Versinterungshohlraums ist die Aufrechterhaltung der Funktionstüchtigkeit

Versinterungshohlraum	VH erforderlich
Kein Versinterungshohlraum	<ul style="list-style-type: none"> • weiche Bergwässer ohne Spritzbetonkontakt • Na-HCO₃-Wässer ohne Spritzbetonkontakt
0–200 Liter/m'	<ul style="list-style-type: none"> • wenig Bergwasser • junges oberflächennahes Wasser ohne Druck • keine pH-Wert-Verschiebung
200–600 Liter/m'	<ul style="list-style-type: none"> • Kalkwässer mit Bergwasserdruck • Spritzbetonbauweise
600–1000 Liter/m'	<ul style="list-style-type: none"> • CO₂-haltige Wässer in Kalksedimenten • CO₂-haltige Wässer und Spritzbetonbauweise
> 1000 Liter/m'	<ul style="list-style-type: none"> • Chemikalieninjektionen • Kalkmilch • extrem starke Kalkwässer mit hohem Druck und hoher Temperatur

Tab. 5: Richtwerte für den notwendigen Versinterungshohlraum
Die Werte gelten für 1 Laufmeter Tunnelröhre. In Zonen ohne Bergwasser kann gegebenenfalls auf die Ausbildung des Versinterungshohlraums zugunsten der verbleibenden wasserführenden Zonen verzichtet werden. Der gesamte Hohlraum V_H · Tunnellänge muss aber immer gewährleistet sein.

des primären Entwässerungssystems. Bei der Berechnung des Versinterungshohlraums darf das sekundäre Entwässerungssystem nicht mitgezählt werden! Die Anordnung des Versinterungshohlraums muss einigen wenigen Grundsätzen genügen:

- Der Versinterungshohlraum **muss zusammenhängend sein!**
- Der Versinterungshohlraum beginnt im First und evtl. in der Sohle und **endet bei den Sickerleitungen.**
- Der Versinterungshohlraum muss direkt an das sekundäre Entwässerungssystem anschliessen.
- Die Querschnittsfläche des Versinterungshohlraums soll im First und evtl. in der Sohle beginnend gegen die Sickerleitungen hin stetig zunehmen. Beim Anschluss an das sekundäre Entwässerungssystem ist die Querschnittsfläche am grössten.
- Die Langzeitstabilität des Versinterungshohlraums muss gewährleistet sein (Bergdruck, Eigengewicht der Konstruktion).
- Kann kein ausreichender Versinterungshohlraum ausgeschieden werden, so

sind Alternativen einzuplanen (z.B. Reduktion und Schutz des Versinterungshohlraums mit Depotsteinen).

- Berechnungen zeigen, dass konventionelle Drainagerohre nicht in der Lage sind, grosse Versinterungshohlräume zu entwässern (Faktor 20 zu klein). Es müssen zusätzliche Massnahmen ergriffen werden, um die Funktionstüchtigkeit des Entwässerungssystems erhalten zu können (vgl. dazu das anschliessende Rechenbeispiel).

Nachfolgend zwei Skizzen für die ideale Anordnung des Versinterungshohlraums bei einem Tunnel mit Gewölbedrainage und einem Tunnel mit Sohl drainagen.

Rechenbeispiel zu den beiden Skizzen (vgl. dazu Abb. 4)

Der notwendige Versinterungshohlraum beträgt 400 Liter/m'. Wie gross muss die Querschnittsfläche des Hohlraums beim Eintritt des Bergwassers in die Sickerleitung sein?

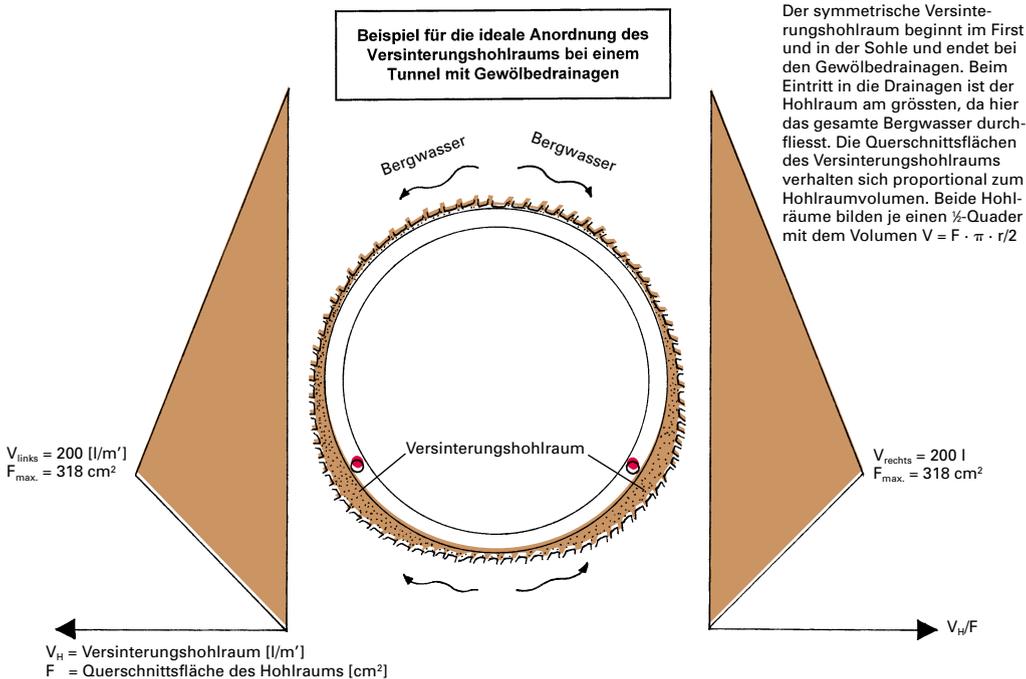


Abb. 4: Ausbildung des Versinterungshohlraums bei einem Tunnel mit Gewölbedrainagen.

V_{total} = Gesamtvolumen eines beliebigen $\frac{1}{2}$ -quadrigen Versinterungshohlraums.

Betrachten wir nur die Hälfte des Tunnels, so sehen wir den Hohlraum mit $V = 200 \text{ l/m}'$ und nur eine einzige Drainageleitung. Die Querschnittsfläche des Hohlraums beim Eintritt in die Drainage sollte maximal sein. Den Hohlraum bilden ein/zwei Quader, die diagonal halbiert sind. Es gilt für das Hohlraumvolumen

$F_{\text{max.}}$ = Querschnittsfläche des Hohlraums beim Eintritt in die Drainage

r = Tunnelradius = 4 m

Lösung (nur rechte Seite):

$$V = \frac{F \cdot \pi \cdot r}{2}$$

$$F_{\text{max.}} = \frac{V \cdot 2}{\pi \cdot r} = 318 \text{ cm}^2$$

Die Lage der Drainagerohre hat keinen Einfluss auf das Ergebnis. Die notwendige totale Querschnittsfläche von 318 cm^2 muss sowohl im rechten wie auch im linken Versinterungshohlraum vorhanden sein. Dies entspricht je einem Rechteck von ca. $3,2 \text{ cm}$

Breite und 1 m Länge. Die Abmessungen der Versinterungshohlräume entsprechen also einem $\frac{1}{2}$ -quadrigen Körper der Grundfläche $F = 3,2 \text{ cm} \cdot 100 \text{ cm}$ und der Höhe $H = \pi \cdot r = 12,6 \text{ m}$. Diese Anforderungen scheinen nicht sehr hoch, lassen sich aber nur durch geschickte Planung des Tunnelprofils bewerkstelligen.

Schwierigkeiten bereitet nicht allein die Ausbildung des Versinterungshohlraums, sondern auch dessen Übergang zu den Drainagerohren, denn hier endet der Versinterungshohlraum. Der Versinterungshohlraum kann nur dann voll ausgenutzt werden, wenn er zusammenhängend ist und kontinuierlich an Volumen \approx Querschnittsfläche gewinnt. Dies bedeutet, dass die Öffnungen der Drainagerohre die gleiche Gesamtfläche aufweisen müssen wie der Versinterungshohlraum am Ende. Die zurzeit eingesetzten Drainagerohre können diese Anforderungen nicht erfüllen, denn sie weisen zu kleine Öffnungsflächen auf.

Die Tabelle 6 zeigt, dass herkömmliche gelochte Sickerrohre nicht in der Lage sind, grosse Versinterungshohlräume zu entwässern (Faktor 20 zu klein), selbst die speziellen

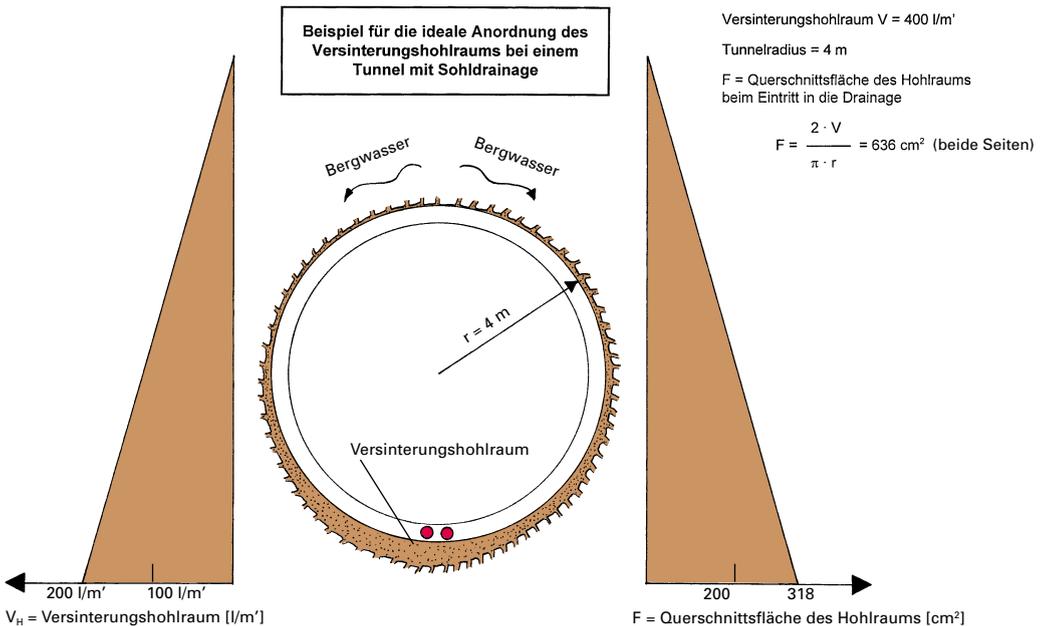


Abb. 5: Ausbildung des Versinterungshohlraums bei einem Tunnel mit Sohl drainage.

Drainage-Rohrtyp \varnothing	Eintrittsfläche (F_G) pro m'	Maximaler Versinterungshohlraum $V = F_G \cdot \pi \cdot r/2$, der dadurch entwässert werden kann	Wahrscheinlicher Versinterungshohlraum der entwässert werden kann wegen verschiedener Reduktionsfaktoren <ul style="list-style-type: none"> • Vlies bedeckt Sickerlöcher • Kies der Sickerpackungen bedeckt die Sickerlöcher/-schlitze
Jansen, Sickerlöcher \varnothing 20 (Löcher auf 180° des Umfangs)	28,9 cm ²	18 l	ca. 10 l
Simona, Deponiesickerrohre, gelocht, \varnothing 20 (Löcher auf 180° des Umfangs)	117 cm ²	73 l	ca. 35 l
Jansen, geschlitzte Rohre \varnothing 20 (Schlitze auf 180° des Umfangs)	115 cm ²	72 l	ca. 35 l
Simona, geschlitzte Deponiesickerrohre \varnothing 20 (Schlitze auf 180° des Umfangs)	145 cm ²	91 l	ca. 45 l

Tab. 6: Übersicht verschiedener Drainagerohrtypen

Es sind die maximal entwässerungsbaren Versinterungshohlräume angegeben bei einem Tunnel mit Kreisprofil und $r = 4$ m.

Deponiesickerrohre verfügen nicht über genügend Eintrittsfläche, um die dauerhafte Drainagewirkung sicherstellen zu können. (Faktor 5 zu klein).

Die notwendige Anschlussfläche des Versinterungshohlraums an die Drainagerohre beträgt in der Regel (bei Strassen und Bahntunnels) zwischen 500 und 1000 cm². Im Normalfall liefern Sickerrohre (Annahme 2 Stück) nur 60 cm² bis 250 cm² (Spezialrohre), wobei diese Öffnungen durch die Kieshinterfüllungen und/oder Anschlüsse (KDB) reduziert werden. Die einzigen Möglichkeiten, um die Funktionstüchtigkeit des gesamten Entwässerungssystems aufrechtzuerhalten, besteht darin,

- mehrere Drainagerohre einzubauen, um die Querschnittsfläche der Öffnungen zu vergrößern,
- periodische Spülarbeiten durchzuführen, um die Öffnungen offen zu halten. (Gelochte Rohre lassen sich besser spülen, haben aber weniger Eintrittsfläche.)

- Einbau von Depotsteinen zum Schutz der Drainageöffnungen vor Versinterungen. Insbesondere während der ersten 5–10 Jahre verhindern Depotsteine zementbedingte Ablagerungen in den Sickerpackungen und allen nachfolgenden Teilen des Entwässerungssystems. Gleichzeitig kann durch die Depotsteine der notwendige Versinterungshohlraum reduziert werden, wobei 1 kg Depotsteine ca. 60 Liter Versinterungshohlraum ersetzt (min. 40 l, max. 110 Liter bei sehr hohen Kalkgehalten und sehr ruhigem Fließregime).

Beispiele für Versinterungshohlräume

- Kiesfüllung zwischen Tübbingring und Fels (Anschluss an das sekundäre Entwässerungssystem beachten)
- Kiespackungen beim Sprengvortrieb in der Sohle/Widerlager
- Druckfeste Drainagematten oder Noppenplatten

- Sickerpackungen/Sickerschichten aller Art
- Bohrungen und Hohlräume im Fels
- Aussparungen (Greiferaussparung, Injektionsaussparung) aller Form und Art sollen nach Möglichkeit nicht verfüllt werden
- Durchlässige Einlagen im Beton
- Verbreiterte Fugen als «Fließkanäle»
- Entwässerungskanäle in der Sohle

Hier ein paar Vorschläge:

TBM-Vortrieb mit Tübbingausbau (Abb. 6)

1. Kiesschicht zwischen Fels und Tübbingring
2. Tübbingaussparungen offen lassen
3. Mörtel in der Sohle so sparsam wie möglich
4. Zusätzliche Aussparungen in die Sohl-tübbinge einlegen / Verbreitern der Tübbing-fugen / Einlegen einer Rasterung in die Fugenbereiche, damit der Versinterungshohlraum zusammenhängend bleibt und an das sekundäre Entwässerungssystem anschlies-sen kann.
5. Extrem starke Vliese und/oder Drainage-matten zwischen Tübbingring und Innenring bieten die beste Möglichkeit, um einen bleibenden Versinterungshohlraum zu schaffen (Langzeitdruckfestigkeit!).

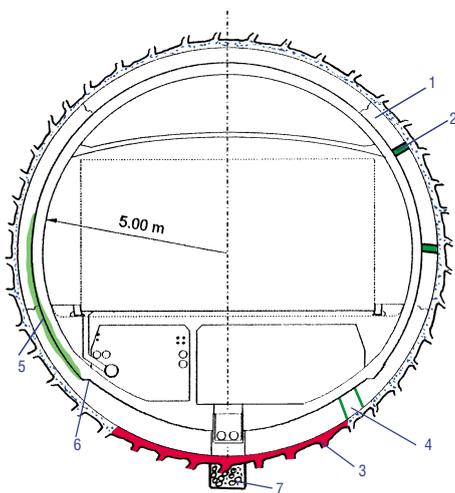


Abb. 6: Tunnelprofil bei TBM-Vortrieb mit Tübbingausbau.

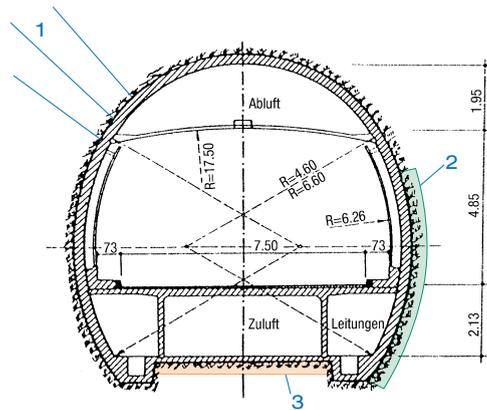


Abb. 7: Tunnelprofil, Sprengvortrieb mit Betoninnenring.

6. Auflagenbereiche Innenring-Tübbingring müssen verstärkt werden, da sonst die Drainage Hohlräume im Laufe der Zeit zusammengedrückt werden und die Fließwege verschliessen, z.B. systematische Noppenbahnstreifen mit hoher Stabilität, die einbetoniert werden.

7. Falls die Massnahmen 1–6 nicht ausreichen oder der Fließquerschnitt durch das Mörtelbett in der Sohle zu stark eingeschränkt wird, kann in der Sohle ein Kanal ausgebrochen werden. Diese Massnahme empfiehlt sich zudem in allen quellfähigen Gesteinszonen!

Sprengvortrieb mit Betoninnenring (Abb. 7)

1. Drainagebohrungen bringen viel Wasser zu Beginn, versintern aber rasch wegen des kleinen Volumens. Sie müssen deshalb unterhaltbar (aufbohren) und somit immer zugänglich sein (Abdichtung).

2. Systematisch angeordnete Hohlräume können gesprengt werden. Diese müssen nicht sehr gross sein, aber in sehr engen Abständen zwischen 1 bis max. 2–3 m angeordnet werden (je dichter das Gebirge, desto enger).

3. Kiesfüllung der Überprofile sind eine einfache und günstige Lösung. Diese zusätzlichen Versinterungshohlräume müssen aber in geeigneter Weise an das Entwässerungssystem angeschlossen werden und dürfen auf keinen Fall durch ein «Nadelöhr» geführt werden!

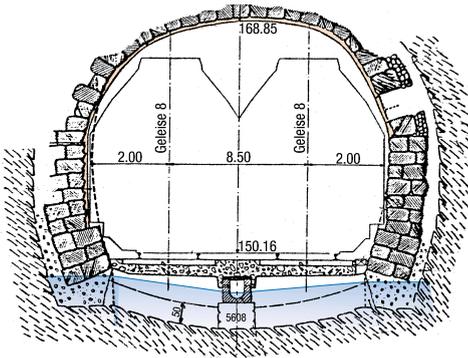


Abb. 8: Tunnelprofil mit Natursteinmauerwerk

Sprengvortrieb mit Natursteinmauerwerk (Abb. 8)

Bei diesem Beispiel ist ausreichend Versinterungshohlraum vorhanden. Insbesondere die Zone Fels-Natursteinmauerwerk kann über mehrere hundert Jahre Versinterungen aufnehmen, ohne dass sich die Fließwege verschliessen und sich ein Wasserdruck aufbauen kann.

Das Tunnelprofil erfüllt aber dennoch nicht alle Anforderungen, die an ein optimal funktionierendes Entwässerungssystem gestellt werden, denn der Tunnel befindet sich in quellfähigen Gesteinszonen.

Die Tunneldole liegt zu hoch. Es resultiert ein sehr hoher Bergwasserspiegel. Die Sohle schwimmt im Bergwasser. Das Bergwasser verteilt sich entlang der Tunnelröhre (Längsgefälle) in alle nachfolgenden Gesteinszonen (Mergel...). Zudem ist die rot eingezeichnete Gunitabdichtung mit einer Dicke von wenigen Zentimetern bis max. 15–20 cm nur kurzfristig eine optimale Lösung. Die Mineralsalze in den Fugen der Natursteine sowie im Bergwasser werden Thaumasischäden und Abplatzungen/Hohlstellen verursachen. An dieser Stelle ist das Aufbringen einer Drainagematte zwischen Natursteingewölbe und Spritzbetonabdichtung, flächenhaft oder linienförmig, dringendst zu empfehlen!

Sprengvortrieb mit Betonverkleidung (Abb. 9)

Das obenstehende Objekt steht stellvertretend für eine ganze Generation von Kraftwerksstollen, die in Mitteleuropa erstellt

wurden. Zwischen den Betonelementen und dem Fels existiert kein Hohlraum. Obwohl im oberen Teil des Stollens das Bergwasser drucklos in den Hohlraum treten kann, ist es möglich, dass sich in unmittelbarer Umgebung unter der Sohle ein hoher Wasserdruck aufbauen kann (> 10 bar), der die Sohlplatte deformieren kann. Oft hält die Sohlplatte dieser Belastung nicht stand und bricht. In der Folge fließt das Bergwasser durch den Riss und verursacht an der Kontaktfläche, bei entsprechender Mineralisation, Korrosionsschäden.

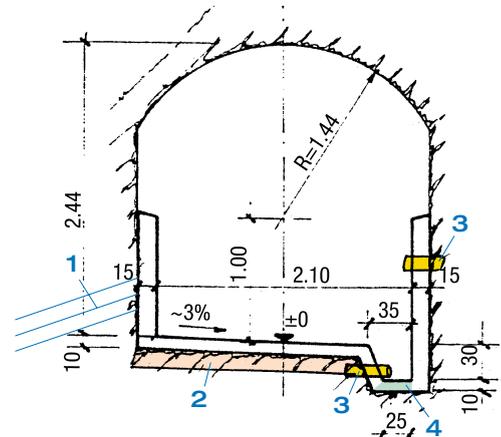


Abb. 9: Stellenprofil mit betonierter Sohle.

Dies wäre nicht passiert, wenn beim Bau ausreichend Versinterungshohlraum eingebaut worden wäre, z.B. durch

1. Entlastungsbohrungen mit grossem Durchmesser
2. Kies/Sandfüllung der Überprofile mit Anschluss an die Rigole
3. Öffnungen in regelmässiger Abstand zur Druckentlastung
4. Stellenweise offene Rigolen, ohne Beton, insbesondere in wasserführenden Zonen. Nicht in Zonen, wo Bergwasser versickern kann (Wasserverluste).

Optimierung des Versinterungshohlraums/Entwässerungssystems

Bei der Projektierung des Versinterungshohlraums empfiehlt es sich nicht, «alles auf eine Karte» zu setzen, sondern eine geeignete Mi-

sung verschiedener Möglichkeiten zusammenzustellen. Es hat beispielsweise keinen Sinn, den gesamten Versinterungshohlraum aus Noppenbahnen bereitzustellen, die dann während der Bauphase mit Schlamm gefüllt oder mit Zementmilch verdreckt oder zusammengepresst werden. Ebenso hat es keinen Sinn, den gesamten Versinterungshohlraum nur mit Depotsteinen zur Verfügung stellen zu wollen, denn die Lebensdauer der Steine beträgt zurzeit ca. 10 Jahre und nicht 100 Jahre. Am sinnvollsten sind Kombinationen, hier ein Beispiel:

- $\frac{1}{3}$ des Versinterungshohlraums sollte mit flächendeckenden Drainagen (Vliese, Drainagematten usw.) zur Verfügung gestellt werden (Vorsicht, während des Einbaus kommt es zu einer Komprimierung durch Betonierdruck).

- $\frac{1}{3}$ des Versinterungshohlraums kann mit Bohrungen, Öffnungen zwischen den Fugen, Kieskoffern, Liniendrainagen in regelmässigen Abständen bereitgestellt werden.

- $\frac{1}{3}$ des Versinterungshohlraums kann durch Depotsteine ersetzt werden. Bei hohem Kalkgehalt des Bergwassers (> 25 °dH) und ruhigem Wasserfluss gilt 1 kg Depotstein \approx 100 Liter Versinterungshohlraum, bei sehr tiefem Kalkgehalt (< 10 °dH) und turbulenter Abfluss gilt 1 kg Depotstein \approx 40 Liter Versinterungshohlraum. Dadurch werden die zementbedingten Versinterungen (Spritzbeton) während der ersten 5–10 Jahre, die rund $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{2}$ der Gesamtablagerungen verursachen, unterbunden. Gleichzeitig bleiben die Sickerpackungen und Öffnungen der Drainagerohre frei und die Unterhaltskosten aller nachfolgenden Teile des Entwässerungssystems reduzieren sich während dieser Zeit um ca. 65–75% (geeignete Einsatzmengen 0,5–3 kg Depotsteine/m³ Tunnellänge). Die Depotsteine bestehen aus dehydriertem Polyamid, das erst in Kontakt mit kalkhaltigem Bergwasser zum Härtestabilisator hydrolysiert und in Lösung geht. In destilliertem Wasser sind die Steine unlöslich. Dadurch lösen sich die Steine entsprechend dem Kalkgehalt des Bergwassers mehr oder weniger rasch auf.

- Einbau von Deponiesickerrohren mit grossen Öffnungen/Schlitzten zur Vergrößerung der Eintrittsfläche. Regelmässige Spülarbeiten zur Freihaltung der Öffnungen.

- Bereitstellen von zusätzlichem Versinterungshohlraum bei Quellen (Leerrohre, Hohlräume).

- Einbau zusätzlicher Drainagerohre, falls möglich in Zonen mit stark kalkhaltigem Bergwasser, Verschluss der Rohre, Inbetriebnahme erst bei Bedarf.

Die Berechnung des notwendigen Versinterungshohlraums wird von vielen Parametern bestimmt, deren exakte Erfassung nicht immer möglich oder zumindest sehr aufwendig ist. Um eine vernünftige Abschätzung zu ermöglichen, mussten Vereinfachungen zugelassen werden. Die Werte des Versinterungshohlraums sind deshalb mit Ungenauigkeiten ± 25 –30% behaftet. Zudem muss die Umsetzung der berechneten Werte in der Praxis anhand der tatsächlich angetroffenen Verhältnisse vor Ort erfolgen. Bei der Wahl der Massnahmen zur Optimierung des Entwässerungssystems sollte man nicht alles auf eine Karte setzen, denn das «Klumpenrisiko» (Versagen dieser spezifischen Möglichkeit) ist zu hoch. Die geeignete Kombination der vorgestellten Varianten verteilt das Risiko, und die angestrebte Lebensdauer des Entwässerungssystems wird auch im Fall von Rückschlägen annähernd erreicht.

Kritische Betrachtung einiger bestehender Entwässerungssysteme in Schweizer Bauwerken

Betrachtungen zu Abbildung 10, Tunnel I

- keine Flächendrainage im Gewölbe, weder an der Kontaktfläche Fels-Spritzbeton noch Spritzbeton-Abdichtung

- keine Längsdrainage im Widerlager/Gewölbefussbereich

- Sohlrainage nicht genau definiert

- Längsentwässerungsleitung ohne Sickerlöcher, nur mit Stichleitungen hinter die Verkleidung

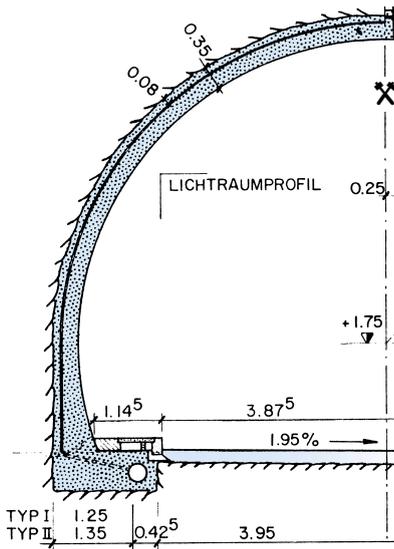


Abb. 10: Tunnelbauwerk mit ungeeignetem Entwässerungssystem, Tunnel I.

Betrachtungen zu Abbildung 11, Tunnel II

- Das flächenhafte Fassen des Bergwassers durch ein primäres Entwässerungssystem ist im Gewölbe nicht ersichtlich
- Gewölbedrainagen fehlen

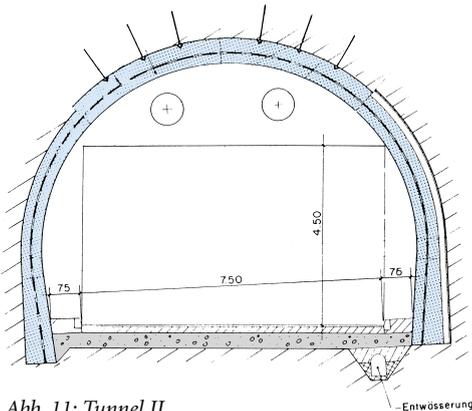


Abb. 11: Tunnel II

- in stark versinterungsgefährdeten Zonen ist eine zweite Sohl drainageleitung zu empfehlen

Betrachtungen zu Abbildung 12, Tunnel III

- flächenhafte Erfassung des Bergwassers im Gewölbe und in der Sohle fehlt

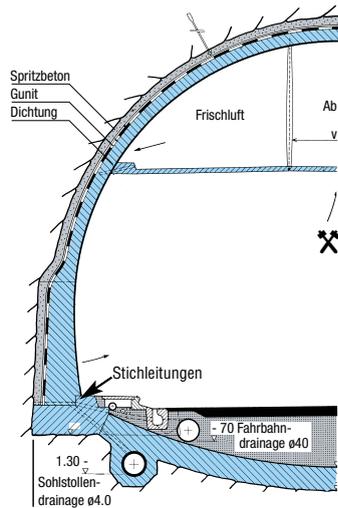


Abb. 12: Tunnel III

- keine Gewölbedrainage im Bereich Gewölbe/Widerlager
- Stichleitungen zur Fassung des Bergwassers im Gewölbefuss zu klein und nicht unterhaltbar
- keine Längsdrainage im ganzen Querschnitt
- Die Sohl drainage im Bild Ø 40 wurde nur während des Baus benutzt und danach entfernt (Hohlräume wenn immer möglich lassen!)
- Das gesamte Bauwerk verdrängt das Bergwasser, anstatt es zu fassen.

Ausbildung des sekundären Entwässerungssystems

Der Zweck eines Entwässerungssystems besteht darin, das anfallende Bergwasser beim Austritt aus dem Gebirge zu fassen und ohne Verluste bis zum Ende des Entwässerungssystems zu führen. Dies verdeutlicht bereits die Schwierigkeit der Aufgabe, denn viele Untertagebauwerke weisen während der Bauzeit trockene Zonen auf, in denen aber zu einem späteren Zeitpunkt Bergwasser anfällt. Für die Bemessung eines geeigneten sekundären Entwässerungssystems sind in erster Linie die zu erwartenden Wassermengen wichtig, denn sie bestimmen die Anzahl und insbe-

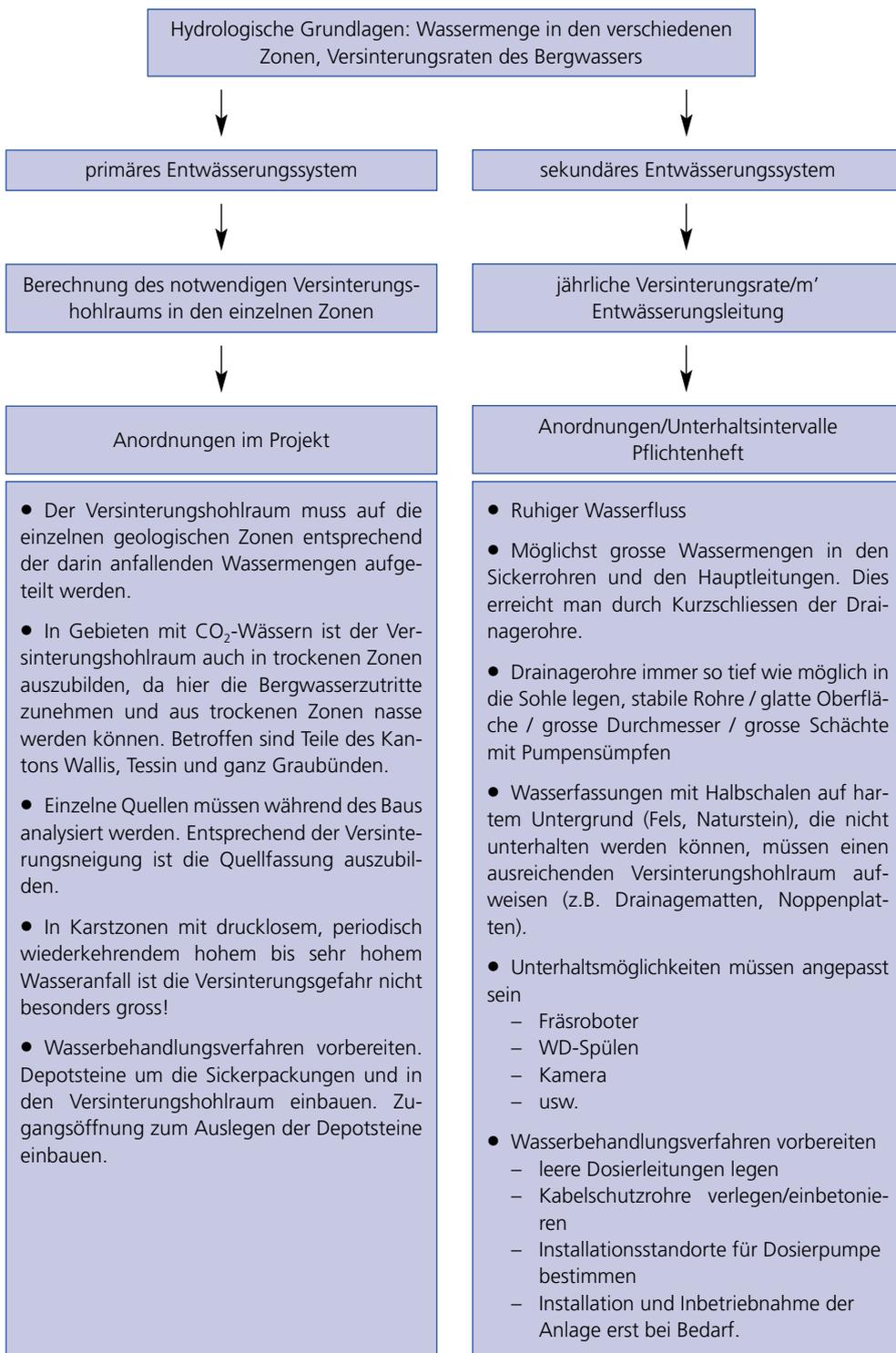


Abb. 13: Vorgehensweise bei der Projektierung des primären und sekundären Entwässerungssystems.

sondere die Abflussquerschnitte der Leitungen. Ebenso wichtig, bisher aber unberücksichtigt, ist die Frage nach dem Chemismus des anfallenden Bergwassers.

Die Grundlagedaten liefern den ungefähren Chemismus des zu erwartenden Bergwassers.

Im Übrigen wurden bereits sehr viele Artikel zur optimalen Ausbildung des sekundären Entwässerungssystems verfasst und sind in der Fachliteratur veröffentlicht worden. Darin können alle Details zu Rohrmaterialien / Durchmesser / Sickerpackungen entnommen werden (z.B. SI+A-Heft 12/2000).

Das Entwässerungssystem in quellfähigen Gesteinszonen

In quellfähigen Gesteinszonen muss das Entwässerungssystem nur dann speziell ausgebildet werden, wenn der Quelldruck Druckschäden oder Sohlhebungen verursachen könnte. In diesen Zonen muss das Entwässerungssystem

speziellen Anforderungen genügen, denn es muss

- das in diesen Zonen anfallende Bergwasser restlos fassen, damit es nicht entlang der Tunnelröhre in andere Zonen fließen kann,
- so dicht sein, dass kein Wasser aus dem sekundären Entwässerungssystem verloren gehen kann,
- den Sohlbereich so trocken wie möglich halten.

Gerade diese Anforderungen wurden bisher ungenügend berücksichtigt. Im Normalfall verfügt fast jedes Bauwerk über eine nasse Sohle, denn die Sickerleitungen und deren Eintrittsöffnungen befinden sich nicht an der tiefsten Stelle, wo sie hingehören, sondern auf Höhe der Fahrbahn/Geleise usw., und in der Sohle befindet sich die Hauptleitung, die nicht drainiert, sondern lediglich ableitet.

Die Folgen davon sind: Das Bergwasser fließt der Schwerkraft folgend entlang der

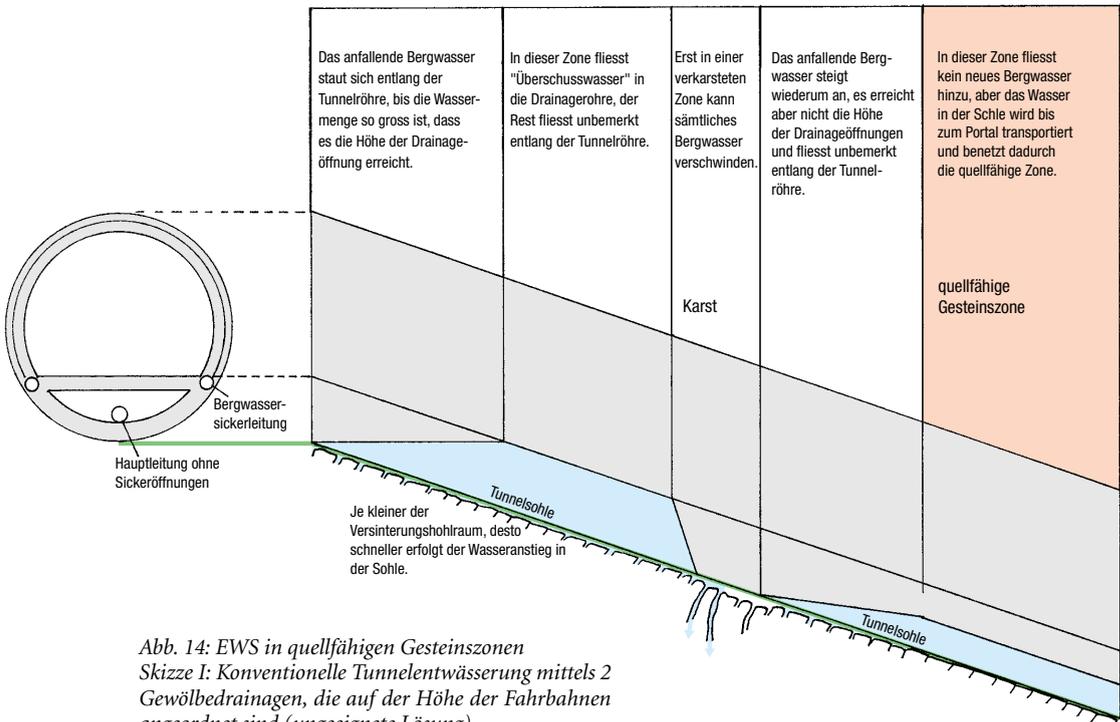


Abb. 14: EWS in quellfähigen Gesteinszonen
Skizze I: Konventionelle Tunnelentwässerung mittels 2 Gewölbedrainagen, die auf der Höhe der Fahrbahnen angeordnet sind (ungeeignete Lösung).

Tunnelröhre gegen das Portal. Erst wenn die Wassermengen zu gross werden oder das Wasser auf unüberwindbare Schwellen wie Mörtel, Injektionsschleier, quellende Felszonen, Schlammansammlungen oder Versinterungen trifft, wird es aufgestaut und kann in die Sickerschlitze eintreten. Im Normalfall fliesst es aber unbemerkt ausserhalb des Bauwerks entlang der Tunnelröhre (vgl. dazu die Skizze I).

In quellfähigen Gesteinszonen muss deshalb ein verbessertes Entwässerungskonzept ausgearbeitet werden. Zu diesem Konzept gehören:

- Entwässerungsleitungen und -kanäle unterhalb der Sohle, die den Wasseraufstau verunmöglichen, und/oder
- Sickerschlitze quer zur Tunnelachse bis tief unterhalb die Sohle, als Barrieren vor den quellfähigen Gesteinszonen, die mit Pumpen das zirkulierende Wasser entlang der Tunnel-

röhre aufnehmen (vgl. dazu die Skizze II) und dadurch den Bergwasserspiegel absenken.

Die beiden Skizzen der Abb. 14 zeigen die Unterschiede zwischen einem konventionellen und dem neuen Entwässerungskonzept. Klar ersichtlich werden die qualitativen Unterschiede zwischen beiden Entwässerungssystemen bezüglich ihrer Fähigkeit, die Sohle trocken zu halten. Es ist zu bemerken, dass das neue Konzept auch Probleme bereitet, denn es ist natürlich nicht einfach, unterhalb des Sohlgewölbes einen Kanal auszubrechen. Insbesondere beim TBM-Vortrieb mit Tübbingeinbau stellen solche «Ideen» die Bauunternehmung vor grosse technische, organisatorische und finanzielle Probleme.

Ist es trotzdem nicht möglich, die Entwässerung in der Sohle zufriedenstellend zu gestalten, so ist die regelmässige Anordnung von Barrieren quer zur Tunnelachse umso wichtiger. Die Barrieren können verschieden gestaltet werden.

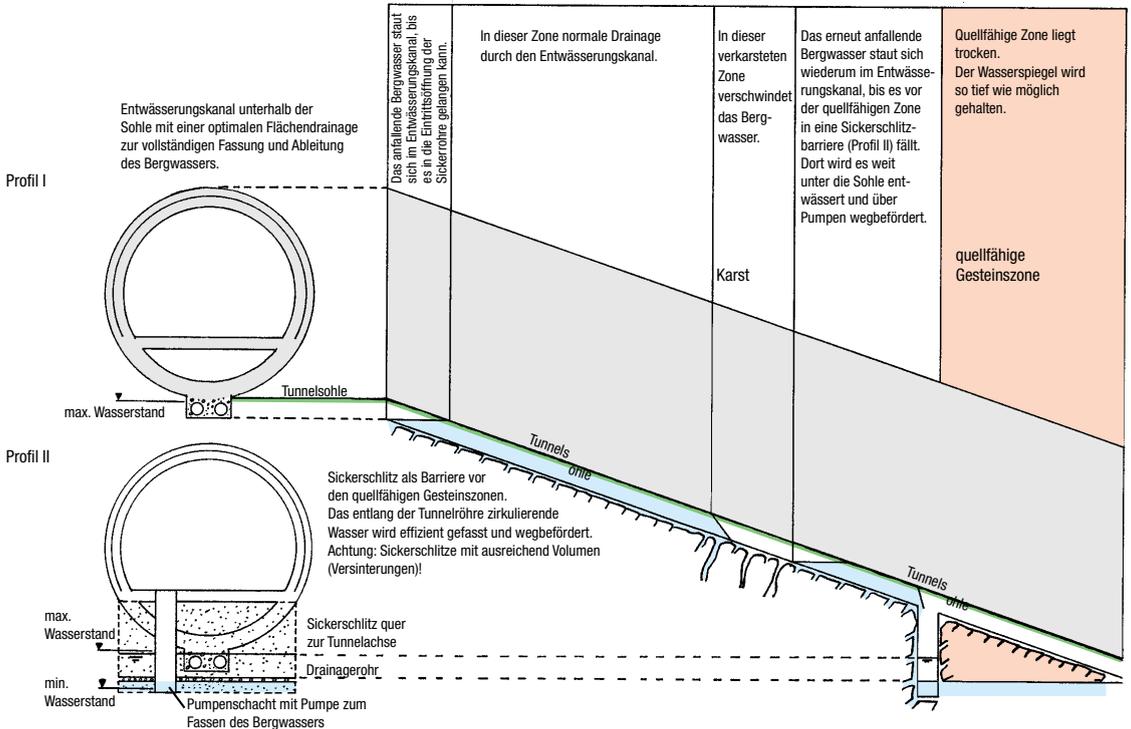


Abb. 14: Skizze II: Bessere Möglichkeit zur Entwässerung des Tunnels durch tiefliegende Drainagen unterhalb des Bauwerks.

- Sehr gut eignen sich ca. 1 m breite, 3–4 m hohe Sickerschichten, die quer zur Tunnelachse die ganze Tunnelbreite abdecken (vgl. dazu die Skizze II). Mit Hilfe von Sickerrohren \varnothing 30 (Längsschlitze) wird der Kieskoffer der Sickerschicht entwässert. Mit einer Pumpe kann der Bergwasserspiegel unter die Sohle abgesenkt werden. Langzeitstabile Depotsteine in der Sickerschicht schützen vor Versinterungen und verhindern dadurch, dass die Wassermengen zurückgehen und die Barriere ihre Wirkung verliert.

- Bohrlöcher in regelmässigen Abständen (10–30 cm) wirken wie Sickerschichten. Sie entwässern zu Beginn sehr gut, versintern aber wegen des kleinen Volumens rasch. Auch wenn die Bohrlöcher mit Bergwasser gefüllt sind, können sie die CO_2 -Entgasung nicht verhindern, da der CO_2 -Partialdruck-Unterschied zu gross ist.

- Injektionsschleier quer zur Tunnelachse zur Erhöhung der Dichtigkeit bringen keine wesentlichen positiven Effekte. An diesen Barrieren staut sich das Bergwasser und umfließt den Schleier. Injektionsschleier in Kombination mit zusätzlichen Entwässerungsmassnahmen könnten einen gewissen Erfolg zeigen, sind aber schwierig auszuführen, und der Erfolg ist ungewiss.

Hilfsmassnahmen

Injektionen

(vgl. dazu die Abb. 15 und 16)

Injektionen zur Reduktion der anfallenden Bergwassermengen haben Vor- und Nachteile.

Vorteile

- Der Wasseranfall kann reduziert werden.

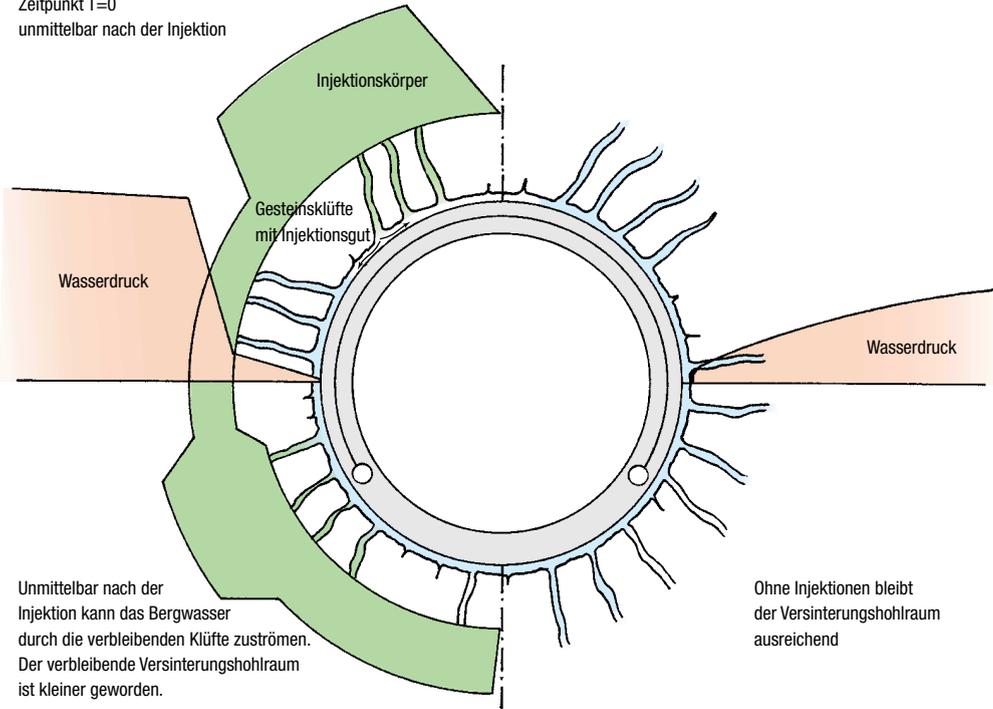
Nachteile

- Der Erfolg der Massnahme ist ungewiss.
- Die Kosten sind erst nach Versuchen erfassbar.
- Durch den Verschluss der Klüfte verkleinert sich der natürliche Versinterungshohlraum. Der Versinterungshohlraum wird in kurzer Zeit mit Ablagerungen gefüllt. Das Bergwasser findet nur noch kleine Fliessquerschnitte vor, die Fliessgeschwindigkeit wird reduziert und der Bergwasserdruck erhöht sich. Dies fördert zudem die Wasserzirkulation entlang der Tunnelröhre.
- Ungeeignete Injektionsmaterialien führen zu höheren pH-Werten und verstärken die Versinterungsrate.
- Der Wasserdruckabfall verlagert sich gegen das Bauwerk hin. Die CO_2 -Entgasung findet nun in unmittelbarer Nähe des Bauwerks statt. Die Versinterungen im Gebirge verlagern sich zum Bauwerk hin.

Fazit:

- Injektionen nur, wenn unbedingt erforderlich.
- Injektionskörper in genügend grossem Abstand zum Bauwerk, damit der Versinterungshohlraum nicht zu klein wird.
- Die Klüfte zwischen dem Injektionskörper und dem Bauwerk nicht füllen – immer offen halten.
- Bei Wasseranstieg können Drainagebohrungen bis zum Injektionskörper den Druck reduzieren. Erst wenn diese Kurzbohrungen nichts ergeben, durch den Injektionskörper bohren.

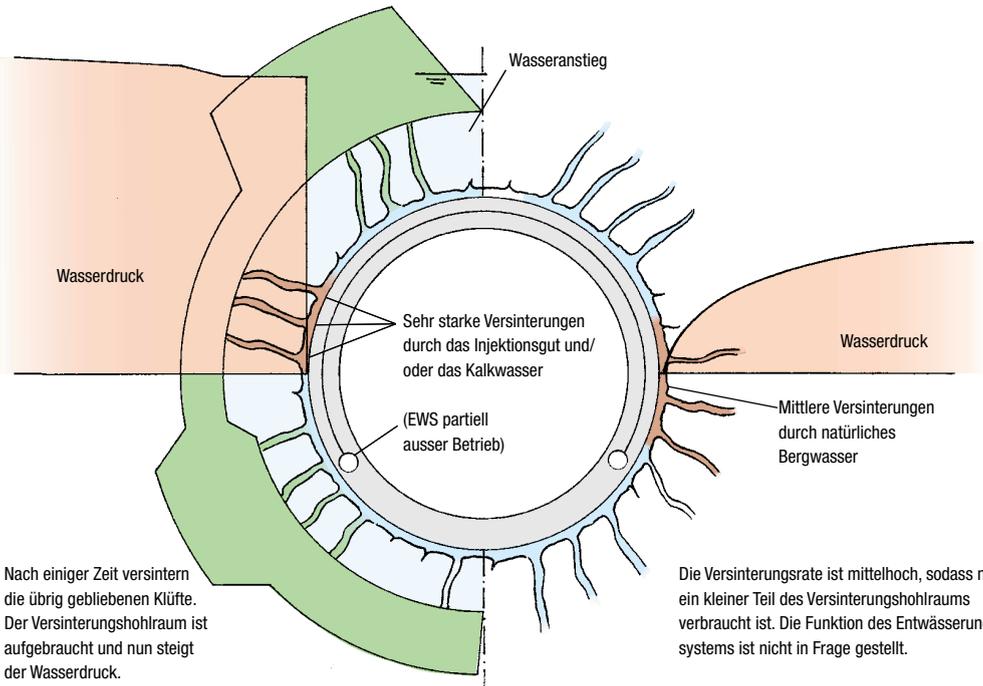
Zeitpunkt T=0
unmittelbar nach der Injektion



Unmittelbar nach der Injektion kann das Bergwasser durch die verbleibenden Klüfte zuströmen. Der verbleibende Versinterungshohlraum ist kleiner geworden.

Ohne Injektionen bleibt der Versinterungshohlraum ausreichend

Abb. 15: Tunnelprofil mit/ohne Injektion zum Zeitpunkt T = 0



Nach einiger Zeit versintern die übrig gebliebenen Klüfte. Der Versinterungshohlraum ist aufgebraucht und nun steigt der Wasserdruck.

Die Versinterungsrate ist mittelhoch, sodass nur ein kleiner Teil des Versinterungshohlraums verbraucht ist. Die Funktion des Entwässerungssystems ist nicht in Frage gestellt.

Abb. 16: Tunnelprofil mit/ohne Injektion zum Zeitpunkt T = 1 (nach 5–10 Jahren)

Grosse Erfolgchancen bestehen

- bei grossräumigem Wasseranstieg in einer Zone hinter einer Betonverkleidung
- hohen Bergwasserdrücken
- durchlässigen Gesteinsformationen
- grossen Wassermengen

Sehr kleine Erfolgchancen bestehen

- bei Zirkulationssystemen, die sich auf lokale diskrete Bahnen beschränken (sog. Wasseradern). 14 Bohrungen im Bözbergtunnel wurden von der Tunnelsohle aus abgeteuft. Das stark mineralisierte Bergwasser konnte lediglich in einer der Bohrungen angetroffen werden (Tropfwasser).
- bei tiefen Bergwasserdrücken
- in dichten, insbesondere quellfähigen Gesteinszonen wie
 - Opalinuston
 - Gipskeuper (vgl. Drainagestollen unter den beiden Belchen-Tunnelröhren)
- bei kleinen Wassermengen

Tab. 7: Erfolgchancen von Drainagebohrungen

Bohrungen

Bohrungen bilden oft die letzte verbleibende Möglichkeit, um unerwünschten Wasserdruck loszuwerden. In südlichen Ländern sind Bohrungen geradezu ein Allheilmittel zur Sanierung von Untertagebauwerken.

Je nach geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen weisen Bohrungen ganz unterschiedliche Erfolgsraten auf (siehe Abb. 15 und 16, S. 154).

Bei Untertagebauwerken ist es bis heute nicht üblich, vorbereitete Massnahmen irgendwelcher Art zu treffen, Massnahmen, die beim Versagen eines Teils der Rohbaustruktur ohne grosse finanzielle und technische Mittel ergriffen werden können, um die Funktionstüchtigkeit der Gesamtanlage aufrechtzuerhalten. Dies ist schade, denn der Nutzen wäre gross. Zu diesen Massnahmen zählen auch vorbereitete Drainagebohrungen zur Wasserdruckentlastung. Gerade in jenen Kantonen, in denen Wasserdruckschäden immer wieder auftreten, wäre dies einige Planungsstunden wert.

Wasserbehandlung

(siehe Tabelle S. 156)

Bei der Wasserbehandlung können zwei Verfahren unterschieden werden. Flüssige Zugabe von Härtestabilisator mit Dosieranlagen oder feste Zugabe von Härtestabilisator mit Depotsteinen (DPS).

Dosieranlagen eignen sich bei

- langen Entwässerungsabschnitten (Tunnels, Kraftwerke, Flughafen)
- mittleren/hohen Wassermengen

Depotsteine eignen sich für

- primäre EWS
 - Sickerpackungen
 - Sickerschichten
 - Sickerschlitze
 - Drainagebohrungen usw.
- feingliedriges EWS
 - Hangentwässerungen
 - Staudämme
 - Stützmauern
- kleine – mittlere Wassermengen teilweise trockenliegend

Erarbeitung einer geeigneten Wasserbehandlung für das primäre und sekundäre Entwässerungssystem

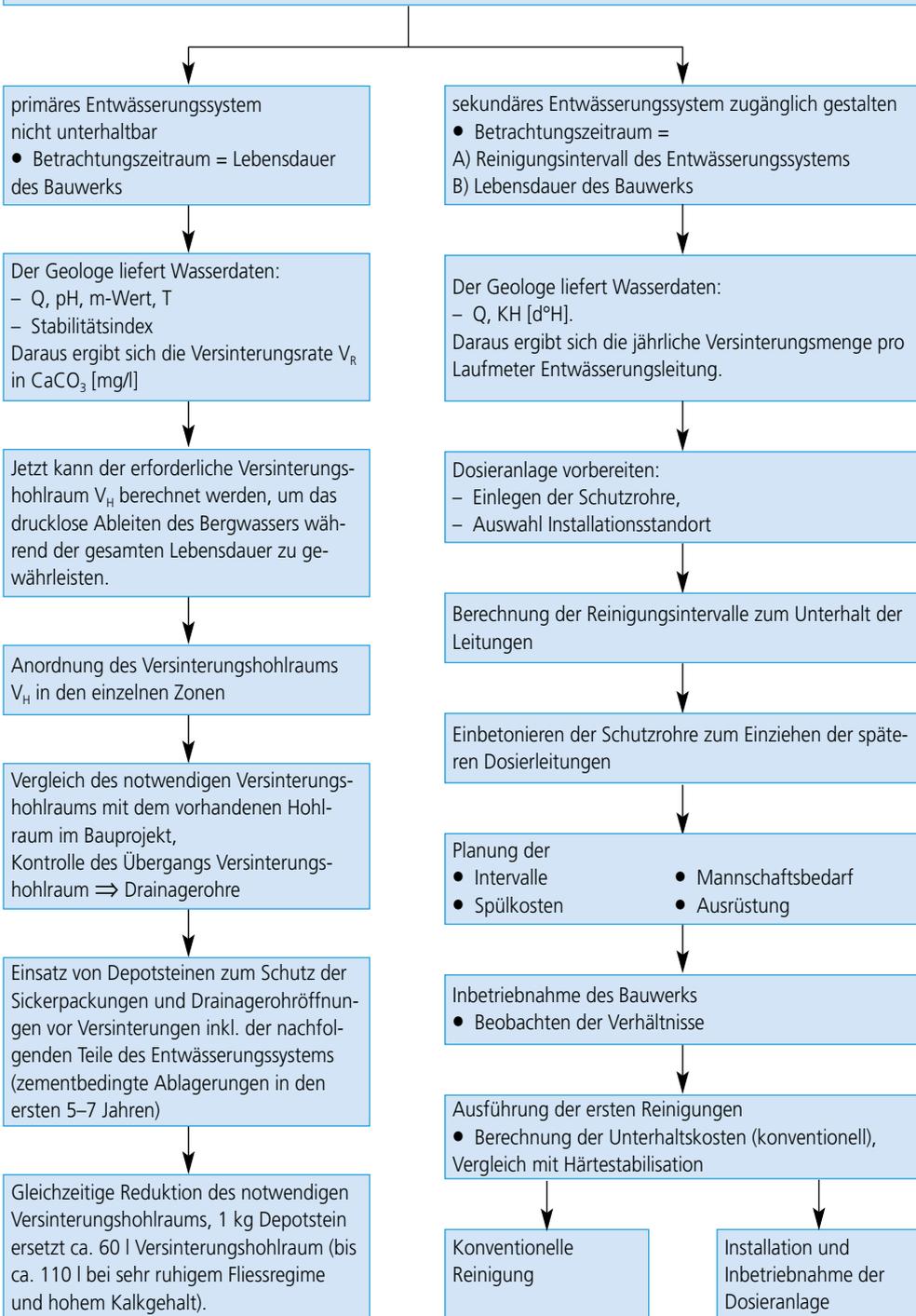


Abb. 8: Vorgehen bei der Erarbeitung einer geeigneten Wasserbehandlung für das primäre und sekundäre Entwässerungssystem.

Betrieb und Unterhalt

Es ist schade, dass in der Vergangenheit die Fachleute, die sich tagtäglich mit dem Unterhalt der bestehenden Tunnelbauwerke beschäftigen, so wenig zur Gestaltung der Neubauprojekte beitragen konnten. Die Gewaltentrennung zwischen Neubau und Betrieb/Unterhalt zieht sich auch heute noch quer durch Europa, mitten durch die Schweiz mit ihren Kantonen, und endet in den Ingenieurbüros in den Köpfen der Fachleute. Statische Probleme werden wochenlang behandelt und die Grösse des Quelldrucks ziert die Traktandenliste der Projektsitzungen während Jahren. Demgegenüber wird die Wahl der geeigneten Drainagerohre und der zugehörigen Schachtdeckel am liebsten gleich dem Lieferanten derselben überlassen. Bei anderen Baumaterialien verhält es sich nicht anders und die Ingenieurbüros verlassen sich immer mehr auf die Aussagen der Hersteller. Dagegen wäre nichts einzuwenden, solange der Ingenieur den Überblick behält. Dies ist allerdings fraglich, trotzdem hat es sich in den vergangenen Jahren gezeigt, dass die Aspekte des Betriebs und Unterhalts immer besser in die Projektierung von Neubauten

Eingang gefunden haben. Dies ist in erster Linie auf die Eigeninitiative der Bauherren zurückzuführen und weniger auf die der Ingenieure. Die Bauherren haben es in der Vergangenheit immer besser verstanden, die Spezialisten ihrer Unterhaltsabteilungen in den Planungsprozess einzubeziehen. Dadurch konnten Finanzen der Beteiligten geschont werden. Hier zwei Vorschläge:

- Bei Neubauprojekten wird der Punkt xy) Betrieb und Unterhalt während der Planung und dem Bau bei allen regelmässigen Projektsitzungen traktandiert und behandelt. Sonst besteht die Gefahr, dass das ursprünglich erstellte Pflichtenheft für den Betrieb und Unterhalt des neuen Bauwerks bei der Übergabe nicht mehr wiederzuerkennen ist und die ursprünglichen Forderungen und Anliegen «etwas gelitten» haben.

- Durchführen von Fachveranstaltungen mit Baumaterialherstellern, Projektgenieuren und Unterhaltsdiensten mit den Themen: Rationeller Unterhalt, Sicherheit, Kostenreduktion, Schadensfälle, positive Erfahrungen mit Neuem, Wünsche der Unterhaltsdienste, Grenzen und Möglichkeiten von Baumaterialien usw.

Anhang

Bezeichnung von Mineralwässern

Masseinheiten

Bei der chemischen Analyse von Mineral- und Bergwässern erwarten wir Resultate zu den Konzentrationen der gelösten festen Bestandteile und Gase. Die in Milligrammen pro Liter (mg/l) ausgedrückte *Massenkonzentration* besagt, welche Masse (Milligramme) des bestimmten Stoffs in der Volumeneinheit (Liter) gelöst ist. Um die chemischen Wechselwirkungen besser überblicken zu können, werden für die Kationen und Anionen zusätzlich die *Äquivalentkonzentrationen* angegeben. Bisher war hierfür die Einheit Millival pro Liter (mval/l) üblich, die aber keine gesetzlich gültige Bezeichnung mehr ist und die mit den gleichen Zahlenwerten nach der Nomenklatur des internationalen Einheitensystems jetzt Millimol (Äquivalent) pro Liter (mmol(eq)/l) oder Mol(Äquivalent) pro Kubikmeter (mol(eq)/m³) heisst. Die Äquivalentkonzentration mmol(eq)/l oder mol(eq)/m³ erhält man durch Division der Massenkonzentration durch die relative Molekülmasse (früher: Molekulargewicht) und die Multiplikation dieses Quotienten mit der Ladungszahl (früher: Wertigkeit) des Ions. Im Falle von Kalzium (Ca²⁺) mit der Molekülmasse (Atommasse) 40,08 und der Ladungszahl (früher: Wertigkeit) 2 ergibt beispielsweise eine Massenkonzentration von 40 mg/l, gerundet eine Äquivalentkonzentration von 2,00 mmol(eq)/l. Seit jeher verwendete man verschiedene Einheiten gleichzeitig, und so benutzen wir heute nach wie vor Begriffe wie Pferdestärke (PS) oder Kalorien, obwohl diese Einheiten neu definiert wurden. Bei den Bezeichnungen von Konzentrationen von Wasserinhalts-

stoffen werden analog mehrere nebeneinander verwendet.

In einer vollständigen Analyse sollte die Summe der Kationenäquivalente gleich gross wie die Summe der Anionenäquivalente sein. Der als *Ionenbilanzierung* bezeichnete Vergleich der beiden in mmol(eq)/l angegebenen Summen dient daher dazu, Richtigkeit und Vollständigkeit einer Wasseranalyse zu überprüfen. In der Praxis begnügt man sich allerdings in der Regel mit der Feststellung, dass sich die Differenz der beiden Summen im Rahmen hält, ansonsten analysiert man weiter, bis man glaubt, den Fehler gefunden zu haben. Wasserprobenanalysen sind nicht ganz einfach durchzuführen, und die Resultate verschiedener Laboratorien variieren für ein und dieselbe Wasserprobe nicht selten ganz erheblich. Deshalb soll bei wichtigen Daten stets eine Kontrollanalyse eines zweiten Labors eingeholt werden.

Klassierung

Für die Klassierung oder Typisierung der Wässer berechnet man schliesslich die prozentualen Anteile der einzelnen Kationen an der Summe aller Kationenäquivalente und die der einzelnen Anionen an der Summe aller Anionenäquivalente. Wenn man die Wassertypen mit chemischen Symbolen bezeichnet, werden zuerst die Kationen, dann die Anionen, die mit mehr als 10 mmol(eq)-% beteiligt sind, in der Reihenfolge ihrer Häufigkeit aufgelistet. Ionen mit mehr als 50 mmol(eq)-% werden dabei unterstrichen, solche mit weniger als 20 mmol(eq)-% in Klammern gesetzt. Bei der Bezeichnung in Worten ist es üblich, zur chemischen Charakterisierung nur diejenigen Ionen heranzuziehen, die sich mit wenigstens 20 mmol(eq)-% an der Kationen- oder an der Anionensumme beteiligen.

Die wichtigsten namengebenden Ionen sind:

Natrium
Magnesium
Kalzium
Chlorid
Sulfat
Hydrogenkarbonat
Karbonat

Das Thermalwasser von Lavey-les-Bains mit 79,6% Na⁺, 14,2% Ca²⁺, 34,2% Cl⁻, 55,8% SO₄²⁻ und Anteilen von weniger als 10% aller anderen Ionen (Analyse aus Högl 1980) wird z.B. wie folgt bezeichnet:

Mit Symbolen:

Na-(Ca)-SO₄-Cl-Wasser

In Worten:

Natrium-Sulfat-Chlorid-Wasser

Mineralwässer als Lebensmittel

Für die in Flaschen oder andere Behältnisse abgefüllten Mineralwässer gelten in der Schweiz die besonderen Vorschriften der Lebensmittelverordnung. Danach wird unter einem «natürlichen Mineralwasser» ein mikrobiologisch einwandfreies Wasser verstanden, das aus einer oder mehreren natürlichen Quellen oder aus künstlich erschlossenen unterirdischen Wasservorkommen besonders sorgfältig gewonnen wird. Es muss sich auszeichnen durch die besondere geologische Herkunft, die Art und die Menge der mineralischen Bestandteile, durch seine ursprüngliche Reinheit sowie durch die im Rahmen natürlicher Schwankungen gleichbleibende Zusammensetzung und Temperatur. Je nach der Zusammensetzung muss oder kann die Sachbezeichnung «Natürliches Mineralwasser» durch spezielle Angaben ergänzt werden. Zum Beispiel muss das Wasser bei einem Mineralsalzgehalt von nicht mehr als 500 mg/l als *natürliches Mineralwasser mit geringem Gehalt an Mineralien* bezeichnet werden; bei einem Gehalt von mehr als 1500 mg/l kann es als *natürliches Mineralwasser mit hohem Gehalt an Mineralien* bezeichnet werden. Oder wenn der Natriumgehalt mehr als 200 mg/l beträgt, ist das Wasser als natriumhaltig zu beschriften; wenn er weniger als

20 mg/l beträgt, ist die Angabe «geeignet für natriumarme Ernährung» erlaubt. Für weitere Vorschriften sei auf die 1986 geänderte Lebensmittelverordnung verwiesen.

Mineral- und Thermalwässer in Kurorten

Für die nicht als Lebensmittel abgefüllten, aber in Kurorten vor allem für Badzwecke verwendeten Mineral- und Thermalwässer gibt es in der Schweiz keine gesetzlichen Vorschriften mehr. In der benachbarten Bundesrepublik Deutschland sind die vom Deutschen Bäderverband herausgegebenen Richtlinien massgebend. Sie können auch zur *Charakterisierung der Mineral- und Thermalwässer schweizerischer Badekurorte* beigezogen werden, wenn wir die im deutschen Bäderwesen traditionelle Angabe der Mineralisation als Massenanteil mg/kg durch die bei uns gebräuchliche Massenkonzentration mg/l ersetzen. Ausser der erwähnten chemischen Klassierung nach den Hauptbestandteilen werden balneologisch besonders wirksame Bestandteile oder Eigenschaften erwähnt, sofern sie die folgenden Werte überschreiten:

Eisenhaltige Wässer

20 mg/l Eisen

Jodhaltige Wässer

1 mg/l Jod

Schwefelhaltige Wässer

1 mg/l Sulfitschwefel (S)

Fluoridhaltige Wässer

1 mg/l Fluorid

Radonhaltige Wässer

666 Bq/l (18nCi/l) Radon

Kohlensäure-Wässer oder Sauerlinge

1000 mg/l Kohlendioxid (gelöst)

Thermen

20 °C (natürliche Temperatur)

Solen

5,5 g/l Natrium und 8,5 g/l Chlorid
(je 240 mmol(eq)/l)

Nach den Richtlinien ist zum Beispiel das erwähnte Wasser von Lavey-les-Bains mit einer Temperatur von 62 °C und einer Schwefelwasserstoff-Konzentration von 4 mg/l eine schwefelhaltige Natrium-Sulfat-Chlorid-Therme.

Die Bestandteile und Eigenschaften, welche namensgebend sein können, machen es verständlich, dass *für ein Lebensmittel und für ein Kurmittel unterschiedliche Anforderungen an ein Mineralwasser* gestellt werden; zum Beispiel ist Schwefelwasserstoff (Sulfid-schwefel) ein bei Badekuren therapeutisch wirksamer Bestandteil, wegen seines Geruchs aber im Mineralwasser als Getränk höchst unerwünscht. Solen, wie sie für Badekuren verwendet werden, sind wegen ihres hohen Salzgehaltes als Getränk völlig ungeeignet. Es leuchtet ein, dass ein in Flaschen abgefülltes Thermalwasser, wenn es den Konsumenten erreicht, seine natürliche Wärme längst verloren hat, weshalb der Begriff Therme für Getränke keinen Sinn macht. Erhöhte natürliche Temperaturen eines Wassers bezeugen aber dessen tiefe Herkunft und können deshalb bei der Qualitätsbeurteilung eines abgefüllten Mineralwassers trotzdem sinnvoll sein.

Die Mineral- und Thermalwasserprovinzen der Schweiz und ihre Kurorte

Jura

Grundgebirge und älteste Sedimente der Nordschweiz. In der Nordschweiz sind die nach Süden abtauchenden kristallinen Gesteine des Schwarzwaldes mit einer sedimentären Schichtenfolge bedeckt, deren älteste Formationen zum Karbon, zum Perm und zum Buntsandstein (Untere Trias) gehören.

Das erstmals 1914 erbohrte und 1955 neu erschlossene Thermalwasser von *Zurzach* tritt zum Teil aus dem Buntsandstein, zur Hauptsache aber aus dem hier direkt darunter folgenden Granit in die zwei Bohrlöcher ein. Es ist mit rund 1000 mg/l schwächer mineralisiert als die Buntsandstein-Rotliegend-Wässer der gleichen Region und ist nach seinen Hauptbestandteilen ein Natrium-Sulfat-Hydrogenkarbonat-Chlorid-Wasser.

Das Mineral Fluorit, das in dem mit den Bohrungen durchfahrenen Buntsandstein vorkommt, spiegelt sich in dem mehr als 10 mg/l betragenden Fluorgehalt des Wassers wider. Die Temperatur des Zurzacher Thermalwassers von 39,3 °C, welche bei einer Tiefe der Zuflüsse von 407–430 m eine geothermische Tiefenstufe von nur etwa 14 m/°C ergäbe, weist auf einen Zufluss aus noch grösserer Tiefe hin.

Unsere Kenntnisse über die Tiefengrundwässer der Nordschweiz wurden in jüngster Zeit durch die Bohrungen der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) beträchtlich erweitert. Chemisch eng mit dem Zurzacher Thermalwasser verwandte Wässer wurden in höheren Teilen des kristallinen Grundgebirges der Nagra-Bohrungen *Leuggern*, *Böttstein* und *Kaisten* angetroffen. Damit zeichnet sich ein zusammenhängendes Tiefengrundwasservorkommen ab, in welchem bei verhältnismässig kleiner Gesamtmineralisation ein Ionenaustausch stattgefunden hat, so dass Natrium das überwiegende Kation ist, im

Gegensatz zu Kochsalzlösungen aber das Chlorid gegenüber Sulfat und Hydrogenkarbonat zurücktritt. Hydrogeologisch können diese Wässer mit einem regionalen Fließsystem interpretiert werden, dessen Wasser im Südschwarzwald eingespeist wird, unter der Sedimentdecke des Tafeljuras eine ungefähr ost-westliche Strömungsrichtung hat und oberhalb Bad Säckingen in den Rhein ausfließt. Die unterirdische Verweilzeit ist auf mehr als 10'000 Jahre zu veranschlagen. Der Bau des Bözbergtunnels hat gezeigt, dass das beschriebene Fließsystem mit grosser Wahrscheinlichkeit weit grössere Dimensionen aufweist. Vom Süden herkommend wurde mit der TBM zunächst die Weströhre aufgeföhren. Im südlichen Abschnitt entsprachen die Wasseranalysen den allgemeinen Erwartungen, denn sie zeigten mittelstark mineralisierte Mineralwässer. Danach folgte der Opalinuston und daran anschliessend die grossen Verschiebungen, die den Tafeljura ankündigen. In diesem 2. Bereich (Opalinuston Nordportal) wurden nunmehr ausschliesslich Natriumsulfat und Natriumchlorid-Tiefengrundwässer angetroffen mit zum Teil extrem hohen Konzentrationen (> 10 mg/l).

Interessanterweise treffen wir diese Wässer auch im benachbarten SBB-Bözbergtunnel an, ebenso können deren Spuren in den beiden Hauensteinbahntunnels sowie im Belchentunnel weiterverfolgt werden. Trotz der relativ hohen Meereshöhe der Bauwerke gelingt es diesen stark mineralisierten Bergwässern, bis in diese Höhe vorzustossen und in die Bauwerke zu infiltrieren. Hüten Sie sich davor, stark mineralisierte Bergwässer während des Baus eines Tunnels als «alte Formationswässer, die sich noch in den Klüften befinden und mit der Zeit auslaufen», zu bezeichnen. Diese Freude wird Ihnen das Bergwasser nicht machen, denn es hat immer einen ganz bestimmten Grund, weshalb sich ein stark mineralisiertes Bergwasser an einer bestimmten Stelle befindet! Die Klüfte können sich entleeren und der Wasseranfall wird zurückgehen, es kann auch jüngeres, schwach mineralisiertes Bergwasser, von oben, zusätzlich zuströmen, aber in der Sohle

wird der Zufluss von stark mineralisiertem Wasser meist unbemerkt weitergehen!

Südlich des zusammenhängenden Vorkommens der verhältnismässig schwach mineralisierten Wässer ist in den kristallinen Sockel des Tafeljuras ein Sedimenttrog mit mehreren tausend Meter mächtigen permischen und karbonischen Ablagerungen eingetieft. Aus dem Perm der Nagra-Bohrungen *Weiach* (1401–1416 m) und *Riniken* (1354–1369 m) sind die Wässer mit den höchsten Konzentrationen an gelösten Bestandteilen in der ganzen Schweiz gefördert worden. In einer Probe erreichen sie mit 97,8 g/l das 2,7-fache der Konzentration von Meerwasser. Wir deuten die Wässer als Formationswässer, die aus Salzseen herzuleiten sind und die in den mehr als 250 Millionen Jahren seit ihrem Einschluss in die Poren der Sedimente noch nicht vollständig durch versickerte Niederschlagswässer verdrängt worden sind. Einflüsse dieser stark mineralisierten Wässer machen sich auch unter dem Vorkommen der relativ schwach mineralisierten Wässer im tieferen Kristallin der Bohrung Böttstein geltend. Ein in der Schweiz ausserhalb der Alpen einzigartiges Mineralwasser traf 1983 eine 600 m tiefe Bohrung in *Rheinfelden* (Engerfeld) an. Das in einer Störungszone ab 342 m Tiefe aus Klüften in permischen Sedimenten und im kristallinen Grundgebirge mit einer Temperatur von 27 °C artesisch aufsteigende Wasser hat mit gegen 1000 mg/l die höchste Kohlendioxidkonzentration aller in der Schweiz nördlich der Alpen bekannten Wässer. Nach seiner vielseitigen Mineralisation (4,5 g/l) gehört es zum Natrium-Kalzium-Hydrogenkarbonat-Sulfat-Chlorid-Typ.

Muschelkalk und Keuper der Nordschweiz. Die mit dem Buntsandstein beginnende Schichtenfolge der Trias setzt sich nach oben mit dem Muschelkalk und dem Keuper fort. (Als Muschelkalk wird eine Formationsgruppe bezeichnet, die nicht nur aus Kalken besteht.) Ablagerungen mit den Kalziumsulfat-Gesteinen Gips und Anhydrit finden sich sowohl im Mittleren Muschelkalk als auch im Mittleren Keuper der Nordschweiz. Der Mittlere Muschelkalk enthält

ausserdem die bekannten Steinsalzlager. Zwischen dem Mittleren Muschelkalk und dem Mittleren Keuper schaltet sich der aus Kalken und Dolomiten bestehende Obere Muschelkalk ein, der wegen seiner Klüftung und Verkarstung die bedeutendste wasserführende Felsformation der Nordschweiz ist, zu der auch noch der geringmächtige, vorwiegend dolomitische Untere Keuper gezählt wird.

Einige der genutzten Mineralquellen treten direkt aus den gips- und anhydritführenden Formationen aus, so das Kalzium-Sulfat-Wasser, das im *Bad-Ramsach* neben der von Schweizerhalle zugeführten Natrium-Chlorid-Sole als örtliches Kurmittel benützt wird. In *Lostorf-Bad* (alte subthermale Gipsquelle), in *Eptingen* und in *Sissach* werden solche Kalzium-Sulfat-Wässer als natürliche Mineralwässer abgefüllt oder zur Herstellung von Süssgetränken verwendet.

Durch Auflösung des Steinsalzlagers des Mittleren Muschelkalks mit in die Bohrlöcher eingeführtem Wasser erzeugen die Vereinigten Schweizerischen Rheinsalinen in Schweizerhalle und in Riburg hochkonzentrierte Natrium-Chlorid-Wässer, die Solen, welche in *Rheinfelden* nahe dem Produktionsort als Kurmittel dienen, aber auch in entfernten Kurorten, wie *Bad-Ramsach* und *Breiten*, zur Anwendung gelangen.

Die Kalke und Dolomite des *Oberen Muschelkalks* enthalten in der Nordschweiz die ergiebigsten Mineral- und Thermalwasservorkommen. Sie beziehen ihre Mineralisation zum Teil aus den darunter- und darüberliegenden Formationen des Mittleren Muschelkalks und des Keupers, zum Teil aus der wasserführenden Formation selbst.

Aus dem Oberen Muschelkalk am südlichen Rand des Faltenjuras stammt eine Reihe von Wässern, die u.a. durch ihren Schwefelwasserstoffgehalt charakterisiert sind.

In *Lostorf-Bad* hat man ein solches schwefelwasserstoffhaltiges Wasser, das zum Kalzium-Magnesium-Sulfat-Typ gehört und rund 2500 mg/l gelöste feste Bestandteile enthält, in einem oberen Mineral- und Thermalwasser-Stockwerk einer von Süden aufstei-

genden Schichtplatte angetroffen. An der gleichen Stelle wurde mit einer tieferen Bohrung ebenfalls im Oberen Muschelkalk ein unteres Stockwerk erschlossen, aus dem am Bohrlochkopf ein nur rund 900 mg/l gelöste feste Bestandteile enthaltendes Kalzium - Magnesium - Sulfat - Hydrogenkarbonat-Thermalwasser artesisch ausfliesst. Für dieses untere Stockwerk ist das Einzugsgebiet nördlich *Lostorf* zu suchen, wo der Obere Muschelkalk zur Erdoberfläche ansteigt. Das Beispiel zeigt, dass an ein und derselben Stelle, aber in verschiedenen Tiefen, Mineralwässer unterschiedlicher Herkunft und Zusammensetzung vorkommen können und dass die tieferen Grundwässer nicht immer die stärker mineralisierten sind.

Zu den Mineral- und Thermalquellen des südlichen Faltenjurarandes gehören auch das Kalzium-Natrium-Sulfat-Chlorid-Thermalwasser von *Schinz nach Bad*, das in einer neuen Bohrung bis rund 2900 mg/l gelöste feste Bestandteile enthält, und schliesslich die Natrium-Kalzium-Chlorid-Sulfat-Thermen von *Baden* und *Ennetbaden* mit rund 4500 mg/l gelösten festen Bestandteilen und einer Temperatur von 47 °C. In *Baden* sind die schwefelwasserstoffhaltigen Thermalwässer in Schottern und Keuperschichten gefasst, in die Wasser durch Klüfte aus dem darunter im Kern der Lägernfalte hochgepressten Oberen Muschelkalk aufsteigt.

Tiefengrundwässer des Oberen Muschelkalks sind sodann aus *Nagra*-Bohrungen in *Leuggern*, *Böttstein*, *Riniken*, *Schafisheim*, *Weiach* und *Siblingen* gefördert worden. Das am stärksten mineralisierte Wasser des Natrium-Chlorid-Sulfat-Typs mit rund 15'300 mg/l gelösten festen Bestandteilen wurde mit der Bohrung *Schafisheim* unter den Molasse-, Jura- und Keuper-Schichten des Mittellandes in einer Tiefe von 1228 bis 1293 m angetroffen. In diesem Muschelkalkwasser kommen auch sehr hohe Konzentrationen von Schwefelwasserstoff (743 mg/l) und Methan (143 mg/l) vor. Dies illustriert den Zusammenhang des für die Thermen des Faltenjurasüdrands (*Lostorf Bad*, *Schinz nach Bad*, *Baden*) typischen Schwefelwasserstoffs mit dem Vorkommen von natürlichen

Kohlenwasserstoffen im Untergrund des schweizerischen Mittellandes.

Im *Oberen Muschelkalk des Tafeljuras* wurden in jüngster Zeit mehrere natürliche Mineralwässer des Kalzium-Magnesium-Sulfat-Hydrogenkarbonat-Typs mit rund 0,8–1,2 g/l gelösten Bestandteilen unter den sie bedeckenden undurchlässigen Keuper-schichten bei *Magden* erbohrt.

Ausserhalb des Tafeljuras, am Ostrand des *Rheintalgrabens* haben Geothermiebohrungen bei *Riehen* in dem in der einen Sondierung über 1500 m tiefen Oberen Muschelkalk Grundwässer des Natrium-Chlorid-Typs (Solen) mit am Bohrlochkopf bis 65 °C betragenden Temperaturen und Summen der gelösten festen Bestandteile bis rund 17 g/l angetroffen.

Mittelland

Westliches Mittelland. Im schweizerischen Mittelland ist *Yverdon-les-Bains* der einzige Badekurort mit einer eigenen Fassung von Mineral- und Thermalwasser (Schinznach Bad und Baden-Ennetbaden gehören geologisch zum Jura). Das zum Kalzium-Magnesium-Hydrogenkarbonat-Typ gehörende Wasser mit einem Gehalt an gelösten mineralischen Bestandteilen von 380 mg/l und mit einer Temperatur von 28 °C am Bohrlochkopf ist in der Nähe der schon von den Römern gefassten Quelle mit einer rund 600 m tiefen Bohrung in Jurakalken (Malm) neu erschlossen worden. Aus einer anderen Bohrung, welche die wasserführenden Jurakalke erst unter 607 m mächtigen Quartär-, Molasse- und Kreide-Schichten erreicht hatte, stammt das seit 1988 in *Yverdon-les-Bains* nunmehr unter dem Namen *Arkina* abgefüllte natürliche Mineralwasser. Es steigt aus 666 m Tiefe auf und fliesst artesisch aus. Wässer, die seitlich des heutigen Broyetals als Quellen aus Schottern austreten, werden in *Henniez* abgefüllt.

Zentrales und östliches Mittelland. Im zentralen und östlichen Mittelland zeigen die Analysen der in Mineralwasser-, Erdöl- und Nagra-Bohrungen angetroffenen Tiefen-

grundwässer, dass die Molasseablagerungen und die unter ihnen vorkommenden Jurakalke (Malm) drei übereinanderliegende Wassertypen enthalten:

1. Kalzium-(Magnesium-)Hydrogenkarbonat-Grundwässer aus nacheiszeitlichen bis ganz jungen Versickerungen.

2. Natrium-Hydrogenkarbonat-Tiefengrundwässer aus Versickerungen während der Eiszeit.

3. Natrium-Chlorid-Tiefengrundwässer aus einer Mischung von Formationswässern des ehemaligen Molassemeeres mit aus Niederschlägen, Flüssen oder Seen versickerten Wässern.

Ein als natürliches Mineralwasser abgefülltes Kalzium-Hydrogenkarbonat-Wasser (Typ 1) ist zum Beispiel in *Schwarzenberg-Bad* bei Gontenschwil mit einem Stollen im Molassesandstein neu gefasst. Ein Natrium-Hydrogenkarbonatwasser (Typ 2) mit etwas über 1000 mg/l Mineralgehalt ist in *Zürich* in Molassesandsteinen bei 295–500 m erbohrt worden und wird unter dem Namen *Aqui* als natürliches Mineralwasser abgefüllt. Die zum Natrium-Chlorid-Typ (Typ 3) gehörenden Mineralwässer von *Eglisau* wurden erstmals 1822 bei einer erfolglosen Steinsalzbohrung angetroffen und später durch weitere Bohrungen erschlossen.

Von Erdöl- und Nagra-Bohrungen ist bekannt, dass es im Untergrund des schweizerischen Mittellandes in tieferen Formationen als den Molassesedimenten und den Jurakalken (Malm) weitere Mineral- und Thermalwässer gibt, die aber nicht genutzt werden. Zu ihnen gehört zum Beispiel das aussergewöhnlich schwefelwasserstoffreiche Wasser des Muschelkalks der Bohrung Schafisheim, auf das wir bereits hingewiesen haben.

Alpen

Préalpes. Aus ehemals viel südlicheren Ablagerungsräumen sind bei der alpinen Gebirgsbildung gewaltige Sedimentmassen über die Zentralmasse hinaus in das Gebiet zwischen Savoyen und Thunersee verfrachtet

worden. In Trias-Zonen dieser als Préalpes bezeichneten Decken sind Kalzium-Sulfat-Wässer wegen der Gipsvorkommen ähnlich wie im Gebiet der Triasvorkommen des Juras stark verbreitet. Sie enthalten häufig auch Schwefelwasserstoff. Kurorte, die solche Wässer anwenden, sind *Lenk* im Simmental und *Schwefelberg-Bad*. Die Quelle des ehemaligen Gurnigelbads und die früher abgefüllte Thermalquelle von Weissenburg beziehen ihre Mineralisation ebenfalls zur Hauptsache aus der Trias der Préalpes. In *Adelboden* wird ein Mineralwasser des Kalzium-Sulfat-Typs abgefüllt.

Zentralmassive und Helvetikum. In zwei Kulminationen ist der kristalline Sockel der Alpen als Zentralmassive durch die Erosion freigelegt: in der Zentralschweiz das Aarmassiv und das Gotthardmassiv, in der Westschweiz das Aiguilles-Rouges- und Arpillemassiv und das Montblanc-Massiv. Über ihren Nordrändern und über ihren axial abfallenden Enden sind die Massive noch mit den wenig dislozierten Sedimenten bedeckt, die man als autochthon und parautochthon bezeichnet und die zusammen mit den weiter nach Norden verfrachteten helvetischen Decken das sogenannte Helvetikum bilden. Die Zentralmassive und ihr autochthoner bis parautochthoner Sedimentmantel zeichnen sich durch mehrere Thermen aus: Lavey-les-Bains, Saxon, Saillon, Leukerbad, Brigerbad und Bad Ragaz-Pfäfers.

Drei dieser Thermen, nämlich Lavey-les-Bains, Saxon und Brigerbad, entspringen im Kontakt kristalliner Kerne mit den sie umhüllenden Sedimenten.

Das verhältnismässig schwach mineralisierte thermale Wasser von *Saxon* tritt am Südrand des Montblanc-Massivs aus dessen Sedimenthülle und wird als natürliches Mineralwasser abgefüllt.

Die Therme des Kurortes *Lavey-les-Bains* steigt dort auf, wo Schuppen von Trias-, Jura- und Kreideschichten das südlich angrenzende Aiguilles-Rouges-Massiv bedecken. Sie ist 1972 mit einer 200 m tiefen Bohrung neu gefasst worden. Die Erwärmung auf die hohe Temperatur von 62 bis 63 °C zeigt, dass das Wasser sehr tiefe Klufbereiche durchflossen

hat. Es handelt sich um ein Natrium-Sulfat-Chlorid-Wasser mit 1320 mg/l gelösten festen Bestandteilen, deren Zusammensetzung auf einen Zufluss aus der Trias, wahrscheinlich auch aus deren salzführenden Formationen in den Préalpes des Gebietes von Bex, und auf Ionenaustauschprozesse hinweist.

Im jungen Badekurort *Saillon* tritt Thermalwasser aus dem parautochthonen Sedimentmantel des gegen Nordosten untergetauchten Arpillemassivs aus.

In *Leukerbad* stammen die Thermalwässer aus dem Sedimentmantel des axial gegen Südwesten abtauchenden Aarmassivs. Das Einzugsgebiet dieser Quellen, deren wärmste eine Temperatur von 51 °C erreicht, ist östlich des Kurorts im Gebiet der parautochthonen Falten der Torrenthorn-Majinghorn-Gruppe zu suchen, wo die Niederschläge in durchlässige Quarzitsandsteine und Kalke des Lias (Unterer Jura) versickern. Die Mineralgehalte von 1800 bis 2000 mg/l verdanken die Kalzium-Sulfat-Wässer dem Zusammentreffen mit dem gipsführenden Trias-Kern der ihr Einzugsgebiet bildenden Falten. Unter dem Faltenkomplex der durchlässigen Lias-Gesteine wird das Wasser auf Schiefern des Unteren Doggers (Mittlerer Jura) gestaut, so dass es zum Aufstieg gezwungen wird und in Leukerbad an rund 30 Stellen zu Tage tritt.

Eine ähnliche geologische Situation wie in Leukerbad finden wir in *Pfäfers*, wo das Aarmassiv gegen Nordosten unter seinen parautochthonen Sedimentmantel abgetaucht ist. Die in den Kurorten *Bad Ragaz* und *Valens* genutzte, 37 °C warme Thermalquelle entspringt in Kreidekalken auf einer die tief eingeschnittene Taminaschlucht querenden Störungszone. In einem nicht sicher bekannten, aber zweifellos westlich von Pfäfers gelegenen Einzugsgebiet gelangen versickerte Niederschlagswässer in grosse Tiefen, aus welchen das erwärmte Wasser in den Kalken durch Karsthohlräume aufsteigt. Chemisch ist es ein Kalzium-Magnesium-Natrium-Hydrogenkarbonat-Wasser mit einem niederen Gehalt von rund 410 mg/l gelösten festen Bestandteilen.

Ein nicht thermales Kalzium-Hydrogenkarbonat-Wasser mit einem Mineralgehalt von rund 500 mg/l tritt bei *Elm* aus parautochthonen Flysch-Gesteinen aus und wird als natürliches Mineralwasser abgefüllt.

Penninische Decken im Wallis und Tesin. Aus den bei der alpinen Gebirgsbildung südlich der Zentralmassive und der helvetischen Alpen zurückgebliebenen penninischen Decken kennt man im Wallis und Tesin mehrere Mineral- und Thermalwässer. Zum Beispiel traf man beim Bau des *Simplontunnels* unter einer Gebirgsbedeckung von 1700 m Thermalwässer mit Temperaturen von 30 bis 49 °C und einer Ergiebigkeit von 300 Litern pro Sekunde an. Badekurorte gibt es in diesem Teil der Alpen nicht mehr. Die Kalzium-Magnesium-Sulfat-Wässer einiger in *Aproz* VS gefassten Quellen werden als natürliches Mineralwasser abgefüllt.

Bündner Alpen. In den penninischen und ostalpinen Decken der Bündner Alpen finden sich auch Trias-Schichten, die wie in anderen Gebieten der Schweiz Gips enthalten und deshalb zur Entstehung von Kalzium-Sulfat-Wässern Anlass geben. Das von Natur aus subthermale (19 °C), für die Badekuren dann stärker temperierte Kalzium-Sulfat-Wasser des Kurorts *Andeer* bezieht derart seinen hohen Gehalt an gelösten festen Bestandteilen aus der Lösung von Gips und vermag sich unter den hohen Bergen zu erwärmen.

In *Vals* ist Thermalwasser (30 °C), das als natürliches Mineralwasser abgefüllt und als Kurmittel verwendet wird, 1980 mit einer 95 m tiefen Bohrung in den mit Gips verknüpften triasischen Dolomiten und Marmoren neu gefasst worden. Auf den Bergen der westlichen Talseite versickernde Niederschlagswässer werden in den durchlässigen Gesteinen tief in das Innere geleitet, wo sie erwärmt und vorwiegend mit dem aus Gips-gestein gelösten Kalzium-Sulfat mineralisiert werden. Mit der Ergiebigkeit von 600 Litern pro Minute und mit 1925 mg/l gelösten festen Stoffen ergaben Berechnungen, dass pro Jahr fast 250 m³ festes Gestein in Lösung gehen. Da man annehmen darf, dass die Thermalquelle seit gut 2000 Jahren läuft, so

hat sie im Berginnern bereits etwa 500'000 m³ festes Gestein, entsprechend einem Würfel von rund 80 m Kantenlänge, herausgelöst.

Ausserhalb des Gebiets der Trias-Vorkommen entspringt in *Serneus* ein schwefelwasserstoffhaltiges Kalzium-Natrium-Magnesium-Hydrogenkarbonat-Wasser aus penninischen Flyschserien.

Die Bündner Alpen zeichnen sich vor allem durch eine grosse Zahl von *Säuerlingen* aus. Das in diesen Wässern in hohen Konzentrationen gelöste Kohlendioxid ist bei der Gesteinsmetamorphose freigesetzt worden, ist aus den grossen Tiefen, wo es entstand, als Gas aufgestiegen und hat sich den durch die Versickerung von Niederschlägen gespeisten Grundwässern beigemischt. Überschüssiges Kohlendioxid, das im Wasser nicht gelöst werden konnte, entströmt als freies Quellgas zusammen mit den Quellen oder, wie bei *Scuol*, unabhängig von diesen als Mofetten dem Untergrund.

Mehrere Säuerlinge finden sich südlich der Rheintalfurche im nördlichen Bündnerschiefergebiet, wo *Rhätzüns*, *Passugg* und *Sassal* die bekanntesten Quellorte sind. Die schwächer mineralisierten dieser Wässer mit rund 1300–1800 mg/l gelösten festen Bestandteilen und natürlicherweise mit rund 500–600 mg/l gelöstem Kohlendioxid-Gas gehören zum Kalzium-Hydrogenkarbonat-Typ und enthalten zum Teil auch Magnesium und Natrium als namengebende Bestandteile; sie werden als natürliche Mineralwässer abgefüllt. In *Passugg* treten zudem Säuerlinge mit höheren Konzentrationen an gelösten festen Bestandteilen aus. Der am stärksten mineralisierte unter ihnen enthält mehr als 10'000 mg/l gelöste feste Bestandteile und 2300 mg/l gelöstes Kohlendioxid; er gehört zum Natrium-Hydrogenkarbonat-Typ.

Die Säuerlinge von *Bad Scuol* und *Taras* entspringen im Bündnerschiefergebiet des sogenannten Unterengadiner Fensters, wo infolge einer Aufwölbung ein tieferes Stockwerk des Alpengebirges als in den umgebenden Bergen freigelegt ist. Der Gas-Aufstieg wird wahrscheinlich durch Klüfte begünstigt, die zu der im Gebirgsbau ein bedeutendes Strukturelement bildenden Engadiner

Störung gehören. Das durch Versickerung von Niederschlägen entstehende und in Klüften zirkulierende Grundwasser vermischt sich mit dem aus der Tiefe aufsteigenden Kohlendioxid und kann dadurch vermehrt mineralische Stoffe aus den Gesteinen lösen. Unter den Wässern lassen sich zwei Haupttypen unterscheiden. Der eine Typ sind die Kalzium-Hydrogenkarbonat-Säuerlinge der linken Talflanke in Scuol mit einem vergleichsweise eher niedrigen Gesamtmineralgehalt zwischen rund 1500 und 2800 mg/l und mit 2200–2400 mg/l gelöstem Kohlendioxid-Gas. Nach Tritium-Messungen beträgt die mittlere unterirdische Verweilzeit der Wässer dieser Gruppe 4–6 Jahre. Der andere Typ hat längere unterirdische Verweilzeiten und ist im Extremfall durch vorherrschende Natrium- und Hydrogenkarbonat-Ionen charakterisiert, wobei zusätzlich vor allem noch Kalzium- sowie Chlorid- und Sulfat-Ionen zu den sehr hohen Konzentrationen an gelösten festen Bestandteilen beitragen. In der Lucius-Quelle von Tarasp betragen diese seit Beginn des 20. Jahrhunderts, als die ersten modernen Analysen ausgeführt wurden, konstant rund 17'200–17'400 mg/l.

Ein von den Unterengadiner Säuerlingen räumlich getrenntes Vorkommen von Kohlendioxidwasser treffen wir im Oberengadin an: Über der bedeutenden Engadiner Störung, auf welcher das Kohlendioxid aus der Tiefe aufsteigen dürfte, entspringt aus Spalten im Granit die Mauritius-Quelle von *St. Moritz-Bad*. Die in das Kristallin eingeklemmten Sedimente machen es verständlich, dass dieser 2500 mg/l Kohlendioxid enthaltende Säuerling eine ähnliche Beschaffenheit wie Wässer der Bündnerschiefergebiete hat. Er ist hier durch vorwiegende Kalzium- und Hydrogenkarbonat-Ionen sowie durch seinen Eisengehalt charakterisiert.

Südalpen. Die Südalpen sind vom alpinen Deckengebirge durch eine gewaltige Bruchzone, die Insubrische Linie, getrennt und von der alpinen Gebirgsbildung wenig betroffen. Die im Erdmittelalter (Mesozoikum) entstandenen Sedimente fallen im äussersten Süden der Schweiz steil unter die jüngeren Ablagerungen der Poebene ab. Dort entspringen ihnen in *Stabio* Natrium-Hydrogenkarbonat-Wässer mit rund 800–1200 mg/l Gesamtmineralgehalt, ähnlich denen des schweizerischen Mittellandes. Sie werden in *Stabio* zu Badekuren verwendet.

Mineralwasserkarte der Schweiz und ihrer angrenzenden Gebiete

In der Beilage findet der Leser die Mineralwasserkarte der Schweiz und ihrer angrenzenden Gebiete. Darin enthalten sind:

Nrn. 1–185 (rot)

Zurzeit bekannte und genutzte Mineralwasserquellen. Die Angaben stammen aus bekannten Literaturwerken wie z.B. O. Högel, ...

Nrn. 200–248 (rot)

Wasseranalysen aus bestehenden Tunnelbauwerken. Die Angaben stammen von Ingenieurbüros, Bauherren oder aus eigenen Analysen.

Nrn. 1–477 (gelb)

Angaben zu alten, grösstenteils in Vergessenheit geratenen Mineralwasserquellen. Die Daten beziehen sich auf den Zeitraum von ca. 1500–1850. Aus den Angaben kann der Geologe und/oder der Bauingenieur auf wertvolle Hinweise bezüglich der Mineralisation des anzutreffenden Bergwassers schliessen. Zudem erleichtert es ihm die ungefähre Berechnung des Stabilitätsindex und die damit verbundenen Abschätzungen des notwendigen Versinterungshohlraums, der die Grundlage für die langfristige Dauerhaftigkeit des Entwässerungssystems bildet. Der Umfang des vorliegenden Buches erlaubte es nicht, alle Angaben über die ehemaligen Quellen vollständig wiederzugeben, aber mit Hilfe der Literaturhinweise sollte es möglich sein, innert Kürze auch die Details zu erfahren.

Hauptquelle: Dr. C. Meyer-Ahrens

Heilquellen und Kurorte der Schweiz

Kanton Waadt

1. Berichtet wird von zwei Quellen am Fusse des Arbel (Entfernung von Villeneuve $\frac{1}{2}$ h Fussmarsch). Dabei soll es sich um kalte reichlich fliessende Schwefelquellen handeln.

2. In Villeneuve wird von einer kalten Schwefelquelle berichtet, die aber nicht mehr benutzt wird.

3. Schwefelhaltige Quelle bei Brent, in der ehemaligen Gemeinde Châtelard.

4. Verschiedene schwefel- und eisenhaltige Quellen in den Alpen rund um Château d'Ex.

5. Schwefelhaltige Quelle bei Cuarny (Entfernung von Yverdon 1 h Fussmarsch). Hier soll um 1810 ein Wassersucher Bohrversuche angestellt haben, wobei brennbares Gas aufstieg. Dies soll sich jedoch nicht wiederholt haben.

6. Zwei eisenhaltige Quellen bei Lausanne, welche von Strube und Sohn analysiert wurden.

7. Schwefelhaltige Quelle bei St-Loup nahe bei La Sarraz. Die Quelle entspringt auf einem Felsen.

8. Schwefelhaltige Quelle bei Lucens. Die Quelle ist heute unbekannt.

9. Eisenhaltige Quelle bei Lussy (Entfernung von Morges 1 h Fussmarsch). Die Quelle ist heute unbekannt.

10. Verschiedene eisen- und schwefelhaltige Quellen bei Morges (Chemismus ähnlich wie die Quellen von Amphion [Savoyen] und Rolle).

11. Drei schwefelhaltige Quellen in dem Alpental von Les Mosses, das Les Ormonds mit dem Pays d'Enhaut verbindet. Ein Hr. Dompiere teilte anlässlich der Versammlung der schweizerischen Naturforscher im Jahre 1824

mit, dass auf Les Mosses ein «stark mit Vitriol gesättigtes Wasser» gefunden worden sei.

12. Schwefelhaltige Quelle bei Moudon, von untergeordneter Bedeutung.

13. Eisenhaltige Quelle bei Pampigny (Entfernung von Cossonay 2 h südwestlicher Fussmarsch). Die Quelle ist heute unbekannt.

14. Verschiedene Schwefelquellen bei Prangins (Entfernung von Nyon 10 Min. Fussmarsch). Der Conservateur Suisse nennt diese Quellen Eisenquellen. Vermutlich erhöhter Salzgehalt.

15. Quelle bei St-Cergues in der Nähe von Nyon. Die Quelle ist seit dem 14. Jahrhundert bekannt. Sie setzte einen starken, erdigen, fettig anfühlenden Niederschlag ab, den man zu Umschlägen verwendete, und hatte einen styptischen Geschmack.

16. Heisse Quelle bei St-Prex (Entfernung von Morges 1 h südwestlicher Fussmarsch) und zusätzlich in unmittelbarer Umgebung eine Eisenquelle.

17. Nahe Roche soll eine sehr interessante Quelle entspringen, der sehr viel Kohlenwasserstoff entspringt und die von einem Arzt in Villeneuve häufig verwendet wurde.

18. Schwefel- und eisenhaltige Quelle bei Rolle am Genfersee (Analyse im Jahre 1818 von Peschier in Genf; Eisenoxyd, kohlensaurer Kalk nebst Kochsalz und Tonerde).

19. Zwei Quellen bei Sullens (Entfernung von Cossonay 2 h südlicher Fussmarsch), verbreitet einen sehr starken Geruch nach Schwefelwasserstoffgas.

20. Asphaltquelle bei Orbe, die schon im Jahre 1722 bekannt gewesen sein soll. Die asphalthaltige Erde wurde als Zusatzmittel zu Zement oder als Wagenschmiere verwendet, später aber nicht mehr benutzt.

21. In der Nähe von Ballaigues sous Rances findet man mit Asphalt imprägnierten Sandstein.

22. Wasserstoffquelle bei Grandcour (Entfernung von Payerne 1½ h nördlicher Fussmarsch).

23. Inkrustierende Quelle bei Le Châtelard. Die meisten zwischen Chillion und Clarens sich in den Genfersee ergiessenden Bäche bilden starken Tuffstein.

Südliches Ufer des Genfersees (F)

24. Thonon, alkalische Quelle bei De la Bersoie (2 km von Thonon), enthält 0,58 g/l feste Bestandteile.

25. Eisenquelle bei Marclaz (4 km von Thonon).

26. Die Quelle Chataigneraz bei Amphion (Stahlsäuerling).

Das Wasser ist kalt und behält seine Temperatur bei jeder Witterung, schwacher Geruch nach Schwefelwasserstoff (Analyse durch Dessaix).

27. Die alkalischen Quellen von Evian:

– Cachat, 8 l/min

– Bonnevie, 40 l/min, 11 °C

– Guillot, 18–20 l/min

– Montmasson, wird nicht benutzt

– Corbereau, wenig Wasser

Die Wasserinhaltsstoffe der Quellen (feste Bestandteile) variieren von 0,234 bis 0,465 g/l.

28. Mehrere Quellen in der unmittelbaren Umgebung von Evian:

Die Quelle De la Grande Rive (Stahlquelle), Maxilly, De la Petite Rive (Stahlquelle), St-André oder Fer à Cheval (Stahlquelle).

Kanton Freiburg

29. Die erdige Quelle bei Champ-Olivier oder Champ-Noe (Entfernung von Murten ¼ h südlicher Fussmarsch). Die Quelle wurde durch Herrn Chodosko (ehem. Prof. in Freiburg) analysiert.

30. Schwefelquelle von Bonn in der Nähe von Düdingen am Fusse der Saane (heute Schiffensee), Geruch nach Schwefelwasserstoff.

31. Die erdige Schwefelquelle von Garmiswil (Entfernung von Freiburg 1 h Fussmarsch), Geruch nach Schwefelwasserstoff.

32. Die Schwefelquelle von Cerniat bei Charmey roch und schmeckte nach Schwefelwasserstoff, am stärksten im Sommer. Das Gas, das sich aus der Quelle entwickelte, entzündete sich bei der Annäherung eines Lichtes.

33. Die bittersalzhaltige Quelle auf dem Cousinberg. Wie wir unten sehen werden, findet sich im sogenannten Burgerwald, einem Eigentum der Stadt Freiburg, der die nördliche Seite des Cousinbergs (deutsch Käsenberg, auch Kesselberg, in der Volkssprache Geissenberg), eines Nachbarn der hohen Berra, bedeckt, eine Gasquelle. Bei dieser Gasquelle fand Götz ein salzhaltiges Wasser, das von v. Fellenberg analysiert wurde, der fand in 1000 Teilen: Schwefelsaures Natron 26,249; schwefelsaure Magnesia 12,827; schwefelsauren Kalk 2,274; Chlornatrium 1,076; feste Bestandteile 42,426 Teile. Das spezifische Gewicht war bei 10 °C 1,0410. Von Fellenberg hielt dieses Wasser für ein Auslaugungsprodukt des Gesteins, aus welchem das Gas hervorquoll, in dem man nachher zwar viele salzige Ausblühungen gleicher Natur, aber kein solches Salzwasser mehr fand.

34. Die Stahlquelle bei der Dürrfluh auf dem Berg Le petit Mont in der Landschaft Jaun entspringt zwischen Schieferen aus einer mergelartigen, rot und grün gefärbten Erde.

35. Schwefelquelle bei Charmey am Fusse des Berges Fin de Dom Hugon. Lüthy untersuchte die Quelle 1818 und fand 2,08 g/l feste Bestandteile, nämlich Kalk und Magnesia, in kohlen- und schwefelsauren Verbindungen, daneben Kohlensaures und Schwefelwasserstoffgas. Metalle werden durch das Wasser schwarz gefärbt. Sehr starker Geruch nach Schwefelwasserstoff, starke Ablagerungen durch das Wasser.

36. Die muriatische Quelle in der Nähe von Semsales. Die Quelle soll in der Nähe von Torflagern und Steinkohlenflözen entspringen sein. Es soll eine Salzquelle gewesen sein.

37. Gasquelle im Burgerwald unweit von Oberried. Die Quelle wurde durch von Fellenberg untersucht, zusammen mit Nr. 33 behandelt in «Verhandlungen der Schweizerischen Naturfreunde-Gesellschaft» im Jahre 1840. S. 79–95, S. 113–115, S. 166–167.

Kanton Wallis

38. Die Augstportquelle entspringt im Matteredal zwischen Embd und St. Niklaus bei Grächen. Die Quelle, «Goldener Brunnen» genannt, soll angeblich eine Salzquelle sein, welche aus gelb gefärbter Felswand entspringt. Im Fels sind die Jahreszahlen 1591 und 1686 eingemeisselt.

39. Die angebliche Schwefelquelle des Bagnabades im Val de Bagnes entspringt im Dorf Bagnes oder Châble.

40. Quelle bei der Kapelle St. Barthelmy, in der im südwestlichen Teil des Val d'Hérens liegenden Alptrift St. Barthelmy. Die Quelle soll eisenhaltig sein. Ihr gegenwärtiger Zustand ist unbekannt.

41. Vier Quellen bei Les Crôsets, in der Nähe von Champéry im Val d'Illeiez. Das Wasser wurde durch Herrn Prof. Bischoff in Lausanne untersucht.

Quelle Nr. 1 enthielt: 1,86 g/l feste Bestandteile, darunter schwefelsauren Kalk und kohlen-saures Eisenoxyd.

Quelle Nr. 2 enthielt: 1,83 g/l feste Bestandteile, darunter schwefelsauren Kalk, kohlen-saures Eisenoxyd und eine namhafte Menge kohlen-saure Magnesia.

Quelle Nr. 3 enthielt: 1,78 g/l feste Bestandteile, darunter schwefelsauren Kalk, kohlen-saures Eisenoxyd und eine namhafte Menge kohlen-saure Magnesia.

Quelle Nr. 4 enthielt: 2 g/l feste Bestandteile, darunter schwefelsauren Kalk, kohlen-saures Eisenoxyd und eine namhafte Menge kohlen-saure Magnesia und kohlen-sauren Kalk.

42. Die Quelle bei Bovernier, an der Strasse über den Gd-St-Bernhard, wurde als eine Schwefelquelle ausgegeben. Ob sie benutzt wird, ist nicht bekannt.

43. Quelle bei Charrat. Es ist bemerkenswert, dass sich die löchrige Rauh-wacke von Saxon bis hierher erstreckt. Vielleicht ist sie auch jodhaltig. Bei der Quelle befindet sich eine schlecht lesbare römische Inschrift «FONS», welche zeigt, dass die Quelle schon vor Zeiten bekannt war.

44. Quelle, die bei Combiolaz (Ort 1860 nicht bekannt) am linken Ufer der Brogne im

unteren Teil des Tales d'Hérémente bei Vexentspringen soll, die auch den Namen Flossbrunn trägt. Die Quelle wurde im Jahre 1544 entdeckt und zu verschiedenen Zeiten auf Kochsalz ausgebeutet. Sie wurde vom Apotheker Baup in Vevey analysiert. Er fand salzsaures Natron, schwefelsaures Natron, schwefelsaure Magnesia, schwefelsauren Kalk, kohlensaurer Kalk, kohlensaure Magnesia und Salzsäure in geringer Menge.

45. Quelle bei Evolène (Eaux longues), ein Dorf im Val d'Hérens. Das Wasser soll Ähnlichkeit mit dem Säuerling von Fideris (rote Markierung Nr. 82) haben.

46. Die Schwefelquelle bei Martigny wurde von Scheuchzer (1717) erwähnt.

47. Quelle bei Orsières, an der Drance in der Nähe zum Eingang in das Val Ferret. Hier entspringt ein Säuerling, der mit dem Säuerling in Courmayeur (rote Markierung Nr. 16) Ähnlichkeit haben soll. Ob die Quelle benutzt wird, ist nicht bekannt.

48. Eisenhaltige und Schwefelquelle auf der Riederalp.

49. Die Rhonequellen, 3 Quellen in der Nähe von Gletsch, welche eine Wassertemperatur von 18 °C aufweisen. De Saussure glaubte, aus seinen Untersuchungen der Hauptquelle auf einen Gehalt an Glaubersalz schliessen zu können. Die Quellen hinterliessen einen roten Niederschlag, Schnee schmolz in der Umgebung bei jeder Kälte und alles war immer grün. Die Quellen vermischten sich danach mit dem 20mal stärkeren Gletscherbach. Ferner schien ihm das Wasser dieser Quellen Schwefelwasserstoff zu enthalten, denn es verbreitete einen Geruch nach Schwefelwasserstoffgas.

50. Rotbachquelle oder das Rotwasser bei Saas im Saastal. Die Analyse von Prof. Ed. Schweizer in Zürich ergab folgende Hauptbestandteile: Schwefelsaurer Kalk in so bedeutender Menge, dass er sich beim Abdampfen des Wassers zur Hälfte in Kristallen ausschied und beim Vermischen des Wassers mit der gleichen Menge Weingeist ein starker flockiger Niederschlag entstand, schwefelsaure Magnesia in geringen Mengen, schwefelsaures Natron in sehr geringer Menge, Chlornatrium in sehr geringer Menge, koh-

lensaure Kalk, kohlensaure Magnesia, Spuren von Eisenoxyd und freie Kohlensäure in geringer Menge. Bei 8,5 °C Lufttemperatur war die Temperatur des Wassers 19 °C. Die Quelle beschreibt schon Collinus (1574) als «roter Bach», als lauwarm. Keine Temperaturveränderung, obwohl seit dieser Zeit zwei Erdbeben stattfanden. Das Wasser setzt einen starken Niederschlag aus Eisenocker ab.

51. Die Quelle bei Sembrancher, am linken Ufer der Drance, in dessen Umgebung sich auch Eisengruben befinden. Es soll eine starke Eisenquelle sein.

52. Das Rotwasser bei Troistorrents im Val d'Illiez enthält nach Gosse in Genf 5,9 g/l feste Bestandteile. Davon schwefelsaurer Kalk 4,166 g/l, schwefelsaure Magnesia 0,868 g/l, kohlensaurer Kalk 0,868 g/l und eine unbestimmte Menge Kohlensäure und Eisen. Der gegenwärtige Zustand der Quelle ist nicht bekannt.

53. Die Quellen von St. Ulrichen, die in einer ganz sumpfigen Gegend zwischen St. Ulrichen und der Rhone entspringen. Es sind angeblich mehrere Schwefelquellen, welche warm sind.

54. Bei Vouvry am linken Ufer der Rhone soll eine Eisenquelle entspringen.

Kanton Bern

55. Die Quelle des Aegertenbades. Unter dem Namen Aegerterbad war einst eine nach Schwefelwasserstoff riechende Quelle bekannt, die im sogenannten Schwandenbergli (Entfernung von Schwanden bei Brienz 1 h Fussmarsch) entspringt.

56. Die Quelle im Walde ob Schüpfheim in Aeschi bei Spiez, eine Schwefelquelle, die schon lange bekannt ist und sehr reichlich fliesst.

57. Die Quelle auf der Bachalp, in der Nähe von Grindelwald, eine starke, kalte Schwefelquelle.

58. Zwei Quellen auf dem Brienzzergrat, am südöstlichen Abhang des Rothorns, mit Schwefelmetallen und Schwefelwasserstoffgas.

59. Quelle bei Burglauenen (Entfernung von Grindelwald 1 h Fussmarsch). Die

Schwefelquelle wurde durch einen Berg-
rutsch und Überschwemmungen verschüt-
tet.

60. Schwefelquelle vom Rotbad bei Hor-
boden im Diemtigtal.

61. Quelle des Ey- oder Oeybades (Ent-
fernung von Adelboden 10 Min. Fuss-
marsch). Die Wassertemperatur beträgt
11 °C bei 19 °C Lufttemperatur.

62. Schwefelquelle bei Färmel (Entfer-
nung von der Lenk 2 h Fussmarsch). Die
Quelle ist von bedeutend starkem Ge-
schmack und Geruch nach Schwefelwasser-
stoff. Die Wassertemperatur beträgt 7 °C bei
21 °C Lufttemperatur.

63. Eine laue Quelle am linken Ufer der
Engstligen (Entfernung von Frutigen 1 h
südlicher Fussmarsch), welche als «Das
Schwefelbad» schon von Wagner (1680) un-
ter seinen warmen Quellen erwähnt wurde.

64. Quelle bei Frutigen, sie hat einen
merklichen Geruch von Schwefelwasserstoff
und soll schwefelsaure Magnesia und Gips
enthalten. Die Wassertemperatur beträgt
10 °C bei 17 °C Lufttemperatur.

65. Quelle des Glütschbades in der Ge-
meinde Amsoldingen. Sie ist wasserarm, von
unbedeutendem Geruch und hat den Ge-
schmack nach Schwefelwasserstoff. Die Was-
sertemperatur beträgt 10 °C bei 20 °C Luft-
temperatur.

66. Die Quelle «auf dem Hubel» (Entfer-
nung von Grindelwald $\frac{1}{4}$ h Fussmarsch). Die
Quelle wird nicht benutzt.

67. Quelle bei Hirsboden im Engstligen-
tal, sie wurde nie benutzt.

68. Eine Quelle bei Krattigen, wird be-
reits von Scheuchzer (1717) erwähnt. Sie soll
die Steine, über die sie fliesst, schwärzen und
riecht nach Schwefelwasserstoff.

69. Die Lehmerenquelle im «Badgraben»
oberhalb Erlenbach im Niedersimmental,
eine schwache, nach Schwefelwasserstoff rie-
chende Quelle, bei der sich einst ein Badge-
bäude mit einigen Wannen befand. Die
Quelle ist jetzt ungenutzt und wurde nie
untersucht.

70. Drei Gipsquellen bei Leissigen, von
Pagenstecher 1820 und Morell 1788 unter-
sucht.

– Trinkquelle (Schwefelquelle), feste Be-
standteile 0,338 g/l (riecht und schmeckt
stark nach Schwefelwasserstoff).

– Badquelle (Schwefelquelle), feste Be-
standteile 1,311 g/l (riecht und schmeckt
stark nach Schwefelwasserstoff, salzigbitterer
Geschmack).

– Lämmliabquelle, feste Bestandteile
1,0176 g/l (enthält flüchtige Gase).

71. Die Quelle im Bette des Lombaches,
im Amt Interlaken, nach Apotheker Müller
schwefel- und eisenhaltiges Gipswasser.

72. Quelle des Magerbades. Sie soll am
nördlichen Abhang des unteren Scheidwal-
des (Entfernung von Gurnigel $\frac{1}{2}$ h westlicher
Fussmarsch) entspringen.

73. Quellen des Reichenbachbades (Ent-
fernung von Reichenbach $\frac{1}{2}$ h Fussmarsch).
Zwei kleine nach Schwefelwasserstoff rie-
chende und schmeckende Quellen, die durch
einen Erdrutsch verschüttet wurden.

74. Quellen in der Nähe von Reutigen,
am Eingang in das Simmental. Eine dieser
Quellen ist offenbar identisch mit der
Glütschbadquelle.

75. Quelle des Rinderwaldbades (auch
Quelle von Adelboden), riecht nach Schwe-
felwasserstoff und hat einen salzigen Ge-
schmack. Feste Bestandteile 1,209 g/l. Die
Gegenstände, über die das Wasser fliesst,
überzieht es mit einer schneeweissen Rinde,
und an der Stelle, wo es aus dem Boden spru-
delt, schweben an den Spitzen der Grashalme
lange weisse Flocken und Fäden, welche die
Bewohner des Hauses «Schwefelseide» nen-
nen. Diese Schwefelseide ist nichts anderes
als *Beggiatoa nivea* (Mikrobiologie).

76. Quelle im Seeholzwald bei Faulensee,
riecht nach Schwefelwasserstoff, hat einen fa-
den, gelind adstringierenden Geschmack.
Frisch an der Quelle gefasst, steigen sogleich
viele kleine Gasblasen in die Höhe, die sich
teilweise am Rand des Gefässes perlartig ab-
setzen. Feste Bestandteile 1,782 g/l.

77. Quellen des Trome- und Turbachba-
des und des Badweidlis im Turbachtal.

– Turbachbad (Entfernung von Saanen
2 h südöstlicher Fussmarsch). Schmeckt
stark nach Schwefelwasserstoff, Wassertem-
peratur 11,3 °C bei 12,5 °C Lufttemperatur.

Gehalt an Schwefelwasserstoff, schwefelsaures Kali, schwefelsaure Magnesia.

– Tromeabad bei Saanen (Entfernung von Gstaad $\frac{1}{2}$ h Fussmarsch), eine Schwefelquelle, die nicht mehr benutzt wird.

– Badweidli (Entfernung von Gstaad $\frac{1}{4}$ h Fussmarsch), Wasser klar, farblos, geruchlos, schwacher indifferenten Beigeschmack. Wassertemperatur 12,5 °C bei 18,8 °C Lufttemperatur.

78. Starke Schwefelquelle bei Weissenburg. Wasser hell, riecht nach Schwefelwasserstoff, hat einen salzigen Geschmack und färbt den Kies, über den es fliesst, schwarz. Rüschi fand darin freie Kohlensäure, Schwefelwasserstoff, kohlen- und salzsauren Kalk und Extraktivstoff, feste Bestandteile ca. 3 g/l. Es wurde gesagt, das Wasser enthalte vorzüglich Gips und Schwefelwasserstoff.

79. Quellen am Fusse des Wispilberges oder der Wallis-Wispile, die das Gsteig vom Lauenental trennt. Die Quellen sollen stark nach Schwefelwasserstoff riechen.

80. Quelle in Zweisimmen, Geschmack von demjenigen gewöhnlichen Wassers nicht sehr abweichend. Der Geruch ist schwach hepatisch, die Wassertemperatur beträgt 12,5 °C bei 22,5 °C Lufttemperatur.

Erdige Wasser mit Eisen

81. Die erdige Stahlquelle von Blumenstein. Die Quelle wurde von Morell, Fueter in Bern (1823) und von v. Fellenberg (1852) untersucht.

82. Die erdige Stahlquelle des Ottenleubades bei Guggisberg. Die Analyse von v. Fellenberg 1839 ergab: feste Bestandteile 0,258 g/l. Das Brunnenbecken und alle Gegenstände, die oft vom Wasser benetzt werden, bekommen eine Rotfarbe, welche die Gegenwart von Eisen im Wasser anzeigt.

83. Die erdige Stahlquelle des Längeneibades bei Guggisberg (Kupferwasser). Das Wasser wurde 1841 von Pagenstecher untersucht, feste Bestandteile 0,233 g/l.

Unbedeutende erdige eisenhaltige Wasser des Berner Oberlandes

84. Die Quelle des Bühlbades, im obersten Teil des Kandertals, an der Gemmistrasse,

Wasser klar, farb- und geruchlos, setzt Ocker ab. Wassertemperatur 9 °C bei 24 °C Lufttemperatur.

85. Eisenquellen im Färmeltal, oberhalb der Schwefelquelle. Das Wasser überzieht die Gegenstände, über die es fliesst, mit Ocker und färbt sie dadurch hochrot. Es ist klar, geruchlos, von adstringierendem Geschmack und wahrscheinlich sehr reich an Eisen.

86. Quelle auf dem Grimmiberg (Grimmialp), im hinteren Teil des Diemtigtals, setzt eine Menge ockerartigen Schlamm ab und ist nicht gefasst.

87. Quelle des Mühlenbades, bei Mühlen, schon von Scheuchzer (1717) erwähnt. Geschmack leicht adstringierend, setzt einen ockergelben Schlamm ab. In den zwanziger Jahren (1820) fand man hier ein mit Gips vermisches Glaubewasser.

88. Die Eisenquelle des Rinderwaldbades (siehe Nr. 75).

89. Quelle des Rothbades (Entfernung von Diemtigen 2 h, von Thun $\frac{1}{2}$ h Fussmarsch). Das Wasser ist frisch geschöpft klar, geruchlos, etwas perlend, der Geschmack zusammenziehend und hat einen bedeutenden Eisengehalt.

90. Scheuchzer erwähnt (1717) einen «Rothen Brunnen», der in der Schwendi auf dem «Kuhgrimmen» in der ehemaligen Vogtei Wimmis entsprungen sein soll.

Alkalische Quellen

91. Die alkalische Quelle des Rosenlaubades in der Nähe von Meiringen, Pagenstecher fand feste Bestandteile von 0,255 g/l. Primär kohlen-saures Natron, das Eisen fehlt.

Unbestimmte Quellen des Berner Oberlandes

92. Quelle des Küblisbades oder Sundlauenbades bei Unterseen am Fusse des Beatenberges. Das Wasser hat einen kaum merklichen unbestimmten Beigeschmack.

93. Quelle bei der Alp Ecksee, in der Nähe von Schwanden.

94. Quelle am Hasliberg, keine näheren Angaben bekannt.

95. Juvibrünneli ober Juckibrünneli in Hoffstetten bei Thun, von Scheuchzer (1717) erwähnt.

96. Quelle im Dorf Kien in der Nähe von Frutigen.

97. Lungenbrünneli bei Goldswil in der Nähe von Interlaken.

98. Angebliche Sauerquelle auf dem Murosried am Brienzerglat.

99. Quelle des Unschlittbrunnens bei Diemtigen. Frisch gefasst trinkbar, nach ein paar Tagen setzt sich Schleim an den Gefässwänden ab und das Wasser stinkt nach faulem Fleisch.

100. Die erdigen Stahlquellen und die Kaltwasserheilanstalt bei Brüttelen. Es finden sich hier drei Mineralquellen: Badquelle, Gesundbrunnen oder Trinkquelle und eine dritte, unbekannt schwache Quelle. Die dritte Quelle fliesst aus einem in Molassegestein getriebenen horizontalen Bohrloch. Sie wurde von Wittenbach 1765, von Moser 1830 und von Pagenstecher 1838 untersucht. Die drei Quellen sind chemisch ähnlich, feste Bestandteile sind 0,396 g/l.

101. Die erdige Stahlquelle bei Worben. Analyse durch Pagenstecher. Feste Bestandteile 0,376 g/l.

Heilquellen untergeordneten Ranges

102. Die Quellen des äusseren Aarzhlebades (auch Mahrzhlebad genannt), in Bern, schon im Jahre 1542 bekannt. Eine Quelle wird von Wagner (1680) als «Schwefelquelle im Sulgenbach» aufgeführt. Analyse durch Morell, feste Bestandteile 0,478 g/l.

103. Die Quelle des Aspibades bei Langnau. Das Bad ist eingegangen. Näheres über die Quelle ist unbekannt.

104. Die Quelle bei Baggwil, setzt ocker-gelben Schlamm ab. Die Quelle wird nicht genutzt.

105. Die Barhausquelle, westlich von Ipsach, aus dem bewegten schlammigen Grunde der Quelle entwickeln sich Luftblasen. In der Auslaufröhre setzt sich ein dichter gelblichroter Schlamm ab.

106. Die Quelle des Biberenbades bei Bibern. Das Wasser soll nach chemischer Untersuchung sehr rein sein.

107. Die Quelle des Biembachbades in der Schlucht des Biembachs bei Hasle. Ana-

lyse durch Pagenstecher 1835. Das Wasser setzt rötlichgelbes Sediment ab.

108. Quelle des Brunnenbachbades bei Zäziwil. Schwache eisenhaltige Quelle.

109. Die Quelle des Brunnenthalbades, bei Brunnenthal. Die Quelle enthielt eine beträchtliche Menge an Eisen, wenig salzsaure Magnesia, salzsaures Natron, viel kohlen- und salzsauren Kalk und wenig freie Kohlensäure. Sie soll an Eisengehalt alle übrigen Quellen im Kanton Bern übertreffen. **Feste Bestandteile 6 g/l.** Wassertemperatur 17 °C bei 8 °C Lufttemperatur.

110. Die Quelle des Bades Bürgisweiher bei Madiswil. Die Quelle entspringt aus mergelhaltiger Dammerde.

111. Die Quellen des Bades Butnigen im Niedereteil der Gemeinde Wahlern, Amt Schwarzenburg.

112. Die Quellen des Kemmeribodenbades in der Nähe von Schangnau, Geruch und Geschmack stark hepatisch und etwas salzig. Das Wasser der kleineren Quelle bedeckt das Gras mit weisslichem Überzug, die darunter befindliche Erde ist in schwarzen Schlamm verwandelt.

113. Die vier Quellen des Dettligenbades bei Radelfingen. Grosse Wassermenge, kaum merkbarer herber Geschmack, überzieht die Gegenstände, über die es fliesst, mit einem gräulichgelben Schlamm. Analyse durch Morell, feste Bestandteile 0,485 g/l, davon sehr viel Magnesium.

114. Die erdige Stahlquelle von Enggiststein. Schwacher Geruch nach Schwefelwasserstoff, der Geschmack merklich herb und zusammenziehend. Die Badehemden werden durch das Wasser stark rotgelb gefärbt, und diese Farbe kann nie mehr entfernt werden; auch wird der Stoff schon nach einem Jahr so mürbe, dass er leicht zerreisst.

115. Bei Grünen in der Nähe von Sumiswald, Badebetrieb bereits im 16. Jahrhundert, die Quelle wurde durch einen Erdbeben verschüttet. Analyse vorhanden, feste Bestandteile 0,393 g/l. Der gegenwärtige Zustand ist nicht bekannt.

116. Die Quelle des Bades Gutenberg bei Lotzwil. Analyse durch Eggimann und Küpfer 1849.

117. Die Quelle des Häbererbades bei Rohrbach. Die Quelle entspringt etwa hundert Schritte südwestlich der Anstalt in ebenem, fettem, mergelhaltigem Wiesengrunde. Die Wände des Sammlers sind mit einer rötlichgelben, faden- und flockenartigen Materie, der *Galionella ferruginea*, überzogen, die sich auch in den Leitungen ansetzt und dieselben zuweilen verstopft. Wasser klar, ohne merklichen Geruch, von etwas herbem, rauhem Geschmack, perlt im Glas.

118. Die Quelle bei Heimiswil, der Gehalt der Quelle ist unbekannt.

119. Die Quelle des Hirsererbades bei Hirseren in der Nähe von Ursenbach. Analyse fehlt, doch soll das Wasser Kalk und Magnesia enthalten. Fische sterben schnell darin.

120. Die erdige Stahlquelle des Schultheissenbades bei Huttwil. Die Wände im Wassersammler überziehen sich mit ockergelbem, flockigem Schlamm (Eisen mit organischen Teilchen). Analyse durch Aeschbach in Aarau.

121. Die Quelle des Kalchmattbades bei Lauperswil. Eine Analyse ist nicht vorhanden.

122. Die Quellen des Kappelenbades bei Kappelen in der Nähe von Wynigen. Das Wasser hat einen zusammenziehenden Geschmack, setzt im Wärmekessel weissgelbe Krusten (Kalkablagerungen) an.

123. Die Quelle des Krummholzbades bei Trachselwald. Eine Analyse fehlt, das Wasser soll jedoch kohlen saure Magnesia und kohlen sauren Kalk enthalten.

124. Die Quelle des Kuttlenbades bei Sumiswald. Soll Eisen und Magnesia enthalten. Setzt im Wärmekessel eine dünne Kruste an.

125. Die Quelle des Lauffenbades bei Bolligen, das Bad liegt in einer engen Seitenschlucht des Krauchtales. Soll Eisen, Kalk und Bittererde enthalten.

126. Die Natronquellen bei Leuzingen. Diese Quellen enthalten viel kohlen sauren Kalk und in ihrer Umgebung findet sich sehr guter Tuffstein. Der «Ursprungsbrunnen» liefert ein vortreffliches Wasser und ist mit gebranntem römischem Mauerstein eingefasst. In der näheren Umgebung sind

sehr viele Quellen mit kohlen saurem Natron.

127. Die Quelle des Limpachbades bei Thierachern, von Scheuchzer (1717) erwähnt, schmeckt und riecht nach Schwefelwasserstoffgas.

128. Quelle des Lochbades bei Burgdorf. Das Wasser setzt im Stollen, durch den es fliesst, gelblichrote, schlammige, flockige und fadige Schlammmassen ab. Wird schon von Wagner (1680) erwähnt.

129. Die Quelle des Löchlibades bei Wasen. Soll Eisen, Bittererde und viele organische Substanzen enthalten.

130. Die Quelle des Löchlibades bei Walkringen. Wahrscheinlich nur eine reine Bergquelle.

131. Die Quelle des Moosbades bei Büren, seit 1744 bekannt. Soll kohlen sauren Kalk, salzsaure Magnesia und Eisen enthalten.

132. Die Quellen des Moosbades bei Lauperswil sollen Eisen enthalten. Badebetrieb seit 1660.

133. Die Quelle des Neuhaus- oder Bolligenbades bei Bolligen, bekannt seit 1705.

134. Die Quelle des Oberburg- oder Fonsbades bei Oberburg, wurde von Wagner (1680) erwähnt und enthält Kalk und Eisen.

135. Die erdige Stahlquelle des Bades Oberwil. Das Wasser wurde von Schaffter und Moser untersucht, feste Bestandteile 0,318 g/l.

136. Die Quelle des Riedbades in der Nähe von Sumiswald im Hornbachtal. Sie wurde von Wagner (1680) als Schwefelquelle bezeichnet.

137. Die Quelle bei Riggisberg. Das Wasser soll sauer schmecken und alles, was mit ihm in Berührung kommt, schwärzen. Der Genuss soll schädlich sein. Bereits im Jahre 1480 liess die Regierung von Bern durch den Stadtarzt Meister Peter in Riggisberg eine Salzader suchen.

138. Die Quelle des Bades Roggengrat bei Eriswil. Das Wasser setzt im Badekessel dünne, grauliche Krusten an und färbt die Badehemden nach einiger Zeit gelblich.

139. Die Quelle des Bades im Rohr bei Biglen. Kalte schwache Stahlquelle, welche nicht mehr benutzt wird.

140. Die Quelle des Rohrmoosbades bei Oberdiessbach. Eine Analyse fehlt, doch scheint das Wasser beträchtlich Eisen und kohlen-sauren Kalk und kohlen-saure Magnesia zu enthalten.

141. Die Quelle Rollimoos, oberhalb von Steffisburg, am Buchholterberg bei Heimenschwand, eine Schwefelquelle.

142. Die Quelle des Wikartswiler- oder Rütihubelbades bei Wikartswil. Die Quelle wurde vom Apotheker Pagenstecher 1833 in Bern untersucht. Darin fand er feste Bestandteile von 0,307 g/l.

143. Die Quelle des Bades Rudswil. Sie soll etwas Eisen und Magnesia enthalten.

144. Die Quellen des Schlegwegbades beim Churzenberg haben einen bemerkbaren Geruch nach Schwefelwasserstoff. Neue leinene, gebleichte Badetücher werden schon nach 3–4 Tagen gelblich und nach einem Jahr so mürbe, dass sie leicht zerreißen.

145. Die erdige Stahlquelle des Schnittweyerbades (Entfernung von Steffisburg $\frac{1}{2}$ h nördlicher Fussmarsch). Die Quelle wird von Scheuchzer (1717) erwähnt und enthält viel Magnesium, Natrium, feste Bestandteile von 0,462 g/l.

146. Die Quelle des Schwändlenbades bei Konolfingen. Eine Analyse fehlt, das Wasser soll jedoch kohlen-saures Natron, Magnesia und eine Spur von Eisen enthalten.

147. Die Quelle des Schwandenbades bei Schüpfen. Das Wasser riecht etwas nach Schwefelwasserstoff und hat einen herben Geschmack.

148. Die Quelle des Schwandenbades bei Steffisburg. Eine Analyse ist nicht vorhanden.

149. Quelle des Talgutbades bei Gerzensee. Das Wasser ist von schwach weissbläulicher Farbe, etwas zusammenziehendem Geschmack und kaum bemerkbarem hepatischem Geruch. Analyse durch Morell und Wagner, feste Bestandteile 0,329 g/l.

150. Quelle des Trubersbrunnenbades bei Herzogenbuchsee. Pfluger in Solothurn wollte Eisen und viel Kohlensäure darin gefunden haben.

151. Die Quelle des Trümmlenbades bei Seedorf. Setzt am Rande des Wärmekessels eine gelbliche Kruste an.

152. Die Quelle des Wildeneybades in der Nähe von Konolfingen. Es soll Eisen, Magnesia und Kalkerde enthalten.

153. Die Quelle des Bades im Wuhr bei Langenthal. Das Wasser enthält salzsauren Kalk und salzsaure Magnesia, kohlen-sauren Kalk, kohlen-saures Eisen, etwas organischen Stoff, freie und gebundene Kohlensäure.

Kanton Luzern

154. Quelle bei Rigi-Scheidegg. Das Wasser hatte einen deutlichen Tintengeschmack. Von Löwig und Schweizer untersucht, feste Bestandteile 0,306 g/l.

155. Das Rigi-Kaltbad ist schon seit dem 16. Jahrhundert bekannt. Analyse vorhanden, feste Bestandteile von 0,692 g/l, zudem viel freie Kohlensäure.

156. Farnbühl. In älterer Zeit galt die Quelle als Schwefelquelle, aus der Analyse aber ergibt sich, dass sie als eisenhaltige Natronquelle betrachtet werden kann, feste Bestandteile 0,277 g/l.

157. Schimbrigbad, alkalische Schwefelquelle mit Schwefelnatrium. Analyse durch den Berner Apotheker Pagenstecher, feste Bestandteile von 0,539 g/l.

158. Die erdige Stahlquelle des Bades bei Schüpfheim oder Badschachen. Die Quelle wurde 1767 entdeckt.

159. Die Quellen von Kragen und Kurzenhütten bei Flühli riechen nach Schwefelwasserstoff.

160. Die Quellen beim Bauernhof Rorigmoos bei Escholzmatt. Eine Salzquelle, die aber nicht genutzt wurde.

161. Die Quelle des Salwydenbades im Hohwald der Kooperationsgenossen Flühli und Escholzmatt, am Fusse des Rothornes. Die Schwefelquelle wurde bereits von Scheuchzer (1717) erwähnt.

162. Die indifferente Quelle des Augstholz-bades bei Hohenrain. Das Wasser enthält viel Kalk, Magnesium und Schwefelsäure.

163. Die erdige Quelle des Bades bei Knutwil in der Nähe von Sursee. Die Quelle wurde in 15. Jahrhundert entdeckt. Das Wasser setzt einen gelben Niederschlag ab. Ana-

lyse durch Bolley und Meister 1864, feste Bestandteile 0,311 g/l.

164. Die erdige Stahlquelle des Bades Lindenhof bei Luzern. Analyse durch Ineichen 1839, der darin feste Bestandteile von ca. 1 g/l fand (Ca-Mg-Na-SO₄-HCO₃-Wasser).

165. Die Stahlquelle des Luthernbades bei Luthern. Die Quelle enthält in geringen Mengen Eisen.

166. Die erdige Stahlquelle des Bades bei Pfaffnau. Die Quelle wurde im Jahr 1700 entdeckt. Analysen durch Weibel und Bolley.

167. Die erdige Stahlquelle des Bades bei Ruswil. Ein Eisensäuerling, die Quelle heisst im Volksmund «Sauerbrunnen». Sehr berühmt im 16. und 17. Jahrhundert. Das Wasser soll Kupfer enthalten. Das Bad war so berühmt, dass es aus Schwaben und dem Elsass und selbst von fremden Gesandten besucht wurde, welche sich an der Tagsatzung in Luzern befanden.

168. Die erdige Stahlquelle bei Sempach, ein Eisensäuerling. Analyse durch Weibel.

Kanton Uri

169. Die eisenhaltige Natronquelle des Moosbades zwischen Altdorf und Flüelen. Der Geschmack ist schwach zusammenziehend und verrät, wie der Geruch, geringe Spuren von Schwefelwasserstoffgas. Analyse von Bolley und Schulz, feste Bestandteile 0,344 g/l.

170. Die Schwefelquelle von Realp. Sie riecht nach Schwefel und überzieht die in Berührung kommenden Grashalme mit einer weissen Kruste.

171. Die Schwefelquelle von Trudelingen. Die Quelle entspringt im Schächenbach und ist nur bei niedrigem Wasserstand sichtbar. Sie riecht schwach nach Schwefelwasserstoff.

172. Die Quelle von Unterschächen. Sie soll bereits 1414 entdeckt worden sein und damals noch eine warme Quelle gewesen sein. In der näheren Umgebung riecht es stark nach Schwefel. Eine benachbarte Wiese nannte man «Schwefelbödmern», obwohl dort kein Wasser entsprang. Grosse Heilkraft.

Kt. Schwyz

173. Erdige Stahlquellen bei Seewen (SZ). Geruch nach Schwefelwasserstoff. Analyse durch Löwig, feste Bestandteile 0,850 g/l (das Wasser reagiert alkalisch).

174. Die Quelle auf der Brunnenalp. Das Wasser wird begierig vom Vieh geleckt, es frisst sogar die von diesem Wasser durchzogene Erde (vermutlich Salzquelle).

175. Eine eisenhaltige Quelle in der Nähe von Einsiedeln. Das Wasser setzt starken Ocker ab.

176. Sehr merkwürdige Quelle (Schwefelquelle?) in der Nähe von Iberg. Sie enthält Schwefelwasserstoff, Kalk, Magnesia, Schwefelsäure und Kohlensäure. Nach neuerem Bericht soll sie viel schwefelsaure Magnesia enthalten. Nach körperlichen Anstrengungen sehr hilfreich. Riecht stark nach faulen Eiern.

177. Schwefelquelle auf der Säbrialp (Entfernung von Alpthal 1 h östlicher Fussmarsch). Salziger Geschmack wie Schinz nach Bad mit sehr viel Sulfat.

178. Quelle auf der Sattelegg bei Lachen, Quelle wurde eifrig vom Vieh aufgesucht. Das Wasser hat einen bittersauren, urinösen, stinkenden Geschmack und färbt blaues Reagenzpapier rötlich. Bereits von Scheuchzer (1717) erwähnt.

179. Eine Schwefelquelle bei Schlagberg (Entfernung von Einsiedeln 1 h Fussmarsch). Sie entspringt aus Tonschiefer und hat den Geruch und Geschmack nach Schwefelwasserstoff. Enthält kohlen- und schwefelsauren Kalk und Magnesia.

180. Schwefelquelle auf dem Stockberg bei Schübelbach. Das Wasser verbreitet einen Geruch nach Schwefelwasserstoff und bildet einen gelben, schwefelhaltigen Überzug.

Kanton Unterwalden

181. Quelle bei Rotzloch. Das Wasser roch und schmeckte stark nach Schwefelwasserstoff, schwärzte den Grund, aus dem es hervorquoll und aus dem sich beständig Luftblasen entwickelten. Rüschi analysierte

das Wasser und fand darin feste Bestandteile von 0,479 g/l.

182. Schwendi-Kaltbad, eine erdige Stahlquelle. Das Wasser hat einen Geruch nach Schwefelwasserstoff, der von flüchtigen organischen Säuren herrührt. Analyse durch Bolley und Schulz, feste Bestandteile 0,404 g/l.

183. Die Schwefelquelle St. Antoni bei Buochs.

184. Die Quellen der Bachschweife, oberhalb des Wylenbades bei Wilen. Sie verfügen über einen starken Geruch nach Schwefelwasserstoff. Beim Stehen wird das Wasser weiss und setzt «Schwefelschlamm» ab (Kalk).

185. Die Schwefelquelle im Eichi bei Alpnach.

186. Die Quelle im Gisi am Stanserberg, beim alten Schloss Eggenburg. 1831 fand Rüsich darin kohlen-saure Magnesia und Kalkerde.

187. Die Quellen von Giswil. Sie sind wasserarm, haben aber einen starken Geruch nach Schwefelwasserstoff.

188. Die Quelle auf dem Kureggen bei Sachseln. Rüsich fand darin kohlen- und salz-sauren Kalk und Magnesia mit relativ viel Sulfat.

189. Die Schwefelquelle am Lopperberg, gegenüber Rotzloch. Die Quelle ist seit jeher ungenutzt und fliesst direkt in den See, sie wurde bereits von Wagner (1680) beschrieben.

190. Die Quelle am Lungernsee, als Bad genutzt seit 1671, Wagner (1680) und Scheuchzer (1717) erwähnen die Quelle.

191. Eisenhaltige Quelle auf dem Stalden (Entfernung von Sarnen 1 h Fussmarsch). Sie wird nicht benutzt.

192. Die Quelle des Wylenbades bei Wilen. Die Quelle wurde von Wagner (1680) erwähnt. Das Wasser zerstört Eisen sehr schnell. Die Analyse ergab kohlen-sauren Kalk und kohlen-saure Magnesia. Apotheker Baurenheim hatte darin Salz- und Schwefelsäure an Kalk und Natron gebunden gefunden. Beim Baden entsteht leicht ein nesselartiger Ausschlag.

193. Salzquellen im Schlierental und bei Alpnach (die Stelle heisst «Im Steinwurf»).

Das Vieh leckt dort das Gras samt Erde begierig weg. Bereits Wagner fand dort in den Wasserproben «gemeines Salz».

Kanton Zug

194. Bad bei Cham. Das Wasser soll viel reine Kalkerde, Gips, wenig Ton und Kiesel-erde enthalten.

195. Bad Walterschweil bei Baar. Im Jahr 1119 soll hier eine warme und eine kalte, sehr heilsame Quelle entsprungen sein.

Kanton Glarus

196. Die Schwefelquelle von Stachelberg mit Schwefelmetallen und dem Geruch nach Schwefelwasserstoff.

197. Die Quelle «Gegenloch» in Nussbühl bei Bilten.

198. Die Quelle bei Glarus. Sie enthält aber nur wenig Mineralsalze.

199. Die Quelle am oberen Ende des Chrauchtales. Ein kaltes Bad, welches von Scheuchzer (1717) und Wagner (1680) erwähnt wird.

200. Die Quelle des Leukelbachbades bei Leuggelbach. Die Quelle wurde von der Linth verschüttet. Rüsich hat diese Quelle zu den Schwefelquellen gezählt.

201. Die Quelle des Lochseitenbades in der Au hinter Schwanden. Sie wurde von der Sernft weggeschwemmt. Sie soll lauwarm und nach Schwanden geleitet worden sein. Zu Wagners Zeit (1680) wurde das Bad noch benutzt.

202. Die Schwefelquelle bei Luchsingen. Sie enthält ausser Schwefelwasserstoff Bittersalz.

203. Die Quelle des Matlauebades bei Engi. Die Quelle wurde ebenfalls von der Sernft verschüttet, lieferte aber anscheinend nur gemeines Wasser.

204. Die Quelle von Mollis. Schon von Tschudi im Jahr 1714 erwähnt.

205. Das Bad bei der Linthbrücke bei Mollis. Eine Analyse ergab, dass die Quelle freie Kohlensäure, Kalk und Magnesium in

Verbindung mit Kohlen- und Salzsäure enthalten soll.

206. Die Quelle von Niederurnen, eine ziemlich reiche Quelle. Sie entspringt am nördlichen Ende des Dorfes Niederurnen aus der rötlichen, eisenhaltigen Nagelfluh des roten Berges. Sie enthält viel Sulfat und Kalk und ist stark mineralisiert. Seit dem Altertum (15. Jahrhundert) bekannt.

207. Schwefelquelle, die nicht weit von der Gegenlochquelle bei Reichenburg entspringt. Das Wasser schmeckt sehr stark nach Schwefelwasserstoff.

208. Die Schwefelquelle auf der Alp Wichlen am Fusse des Panixerpasses im Sernftal. Sie wurde bereits von Wagner (1680) erwähnt, roch stark nach faulen Eiern. Das spez. Gewicht ist extrem leicht.

Kanton Zürich

209. Erdige Stahlquelle bei Nuolen.

210. Nidelbad bei Rüschiikon. Eine erdig-alkalische Stahlquelle mit dem Geruch nach Schwefelwasserstoff. Analyse durch Löwig, feste Bestandteile 0,386 g/l.

211. Wenigbad oder Aeugsterbad bei Aeugst, mit einer erdigen Quelle. Analyse durch Schweizer, feste Bestandteile 0,484 g/l.

212. Das Bad bei Mönchaltorf mit einer erdigen Stahlquelle. Das Wasser hat einen deutlichen Geruch nach Schwefelwasserstoff, der sich sogleich verliert. Der Geschmack ist etwas tintenhaft. Analyse durch Löwig, feste Bestandteile 0,343 g/l.

213. Inneres Gyrenbad mit einer erdigen Quelle. Bekannt seit dem 15. Jahrhundert unter dem Namen «Fressbad», weil es die Esslust fördern soll. Es ist keine Analyse vorhanden.

214. Äusseres Gyrenbad mit einer erdigen Quelle. Die Quelle liefert 11 Mass Wasser in der Minute. Feste Bestandteile 0,311 g/l.

215. Stammheim am Stammer-Berg. Analyse vorhanden, feste Bestandteile 0,550 g/l. Das Wasser enthält fast nur Kalk, kaum Sulfat.

216. Quelle des Bades bei Urdorf. Zu Konrad Gessners Zeit eine äusserst gediegene

Badeanstalt, gebaut 1526 (balnea, quæ a pago Urdorfino nominantur), wurde mit Prädikat (splendide constructa) ausgezeichnet. Es ist eher ein Trinkwasser, kein Mineralwasser.

217. Eisenhaltige Quelle in der Enge. Sie wurde im Jahre 1659 von Dr. Gyger als eisenhaltige Quelle eingestuft.

218. Quelle bei Oerlikon. Wurde 1684 von Dr. Salzberger beschrieben und als Heilquelle eingestuft.

219. Quelle des Wannenbades bei Stäfa. Sehr berühmte, ergiebige, kalte Quelle. Badeanstalt seit 1538 (Peter Wyslimg).

220. Quelle des Lörlibades oder Röhrlibades, existiert bereits seit 1470.

Vor alten Zeiten befand sich $\frac{1}{2}$ Stunde von Winterthur in einem Wald, Lindberg genannt, ein Bad, das obigen Namen trug. Es existierte schon in den Siebzigerjahren des 15. Jahrhunderts, und es wurde auch noch im Jahr 1527 benutzt. Bald aber ging es an Schultheiss und Rat der Stadt Winterthur über, und nun wurde die angebliche Heilquelle zu zwei anderen Quellen (im Mockentobel) geleitet, welche nach der «oberen Badstube» in Winterthur flossen. Sie war eine jener berühmten Badestuben, die im Mittelalter eine wichtige Rolle spielten. Besonders merkwürdig ist sie aber deswegen, weil sie im Jahr 1425 bereits vier Freibriefe von den Habsburgern besass, zwei von Herzog Albrecht von Österreich (1349 und 1387), einen von Herzog Leopold (1392) und einen von Herzog Friedrich von Österreich (1407), zu welchen im Jahr 1437 noch ein weiterer von Herzog Albrecht kam. Durch diese Briefe erhielten die Besitzer das Recht, dass weder in der Stadt noch in ihrem Friedkreis eine andere Badestube erbaut noch gehalten werden durfte. Diese Badestube erhielt dann durch die Lörlibadquelle den Namen «Lörlibad». Im Jahr 1537 erhielt dieselbe eine Badeordnung, welche auf die Sitten jener Zeit ein interessantes Streiflicht wirft. Da wird zuerst das Zusammenbaden der beiden Geschlechter in den selben Zubern verboten, ebenso durften mit Beingeschwüren oder anderen «bösen Schäden» behaftete Menschen nicht mit Gesunden in den selben Zubern baden, ferner durfte der Bader «Niemandts in das

Bad sich aus dem Staub und Koth zu waschen gan vergunnen». Niemand durfte Tiere, Kleider, Schuhe, Kot oder anderes in das Bad werfen. Ebenso war es verboten, andere im Bade zu «taufen» oder unziemlich mit Wasser zu bespritzen, grobe Reden zu führen, Gewehr oder Waffen ins Bad zu nehmen, andere beim Baden zum Lügen oder Aussprechen von Unwahrheiten anzuleiten, Gott zu lästern usw.

Das Wasser der drei Quellen von Lindberg und der beiden Mockentobelquellen scheint zu den erdigen Wassern gehört zu haben. In der Gegend, wo die Quellen des alten Lörlibades entsprangen, wurde eine rötliche Erde gefunden, welche die Töpfer als Basis der grünen Glasur gebrauchten und «Huberde» (Tonerde?) nannten. Die obere Badestube existierte noch im Jahre 1841.

221. Quelle des Rosenbades zwischen Turbenthal und Wila. Die Quelle enthält lediglich 0,303 g/l feste Bestandteile.

Kanton St. Gallen

222. Das Bad Reuthe (A). Schmeckt stark zusammenziehend, tintenartig und entwickelt Luftbläschen. In den Leitungen setzt sich so viel Eisenoxyd an, dass es jeden Tag entfernt werden muss.

223. Eisenhaltige Quelle bei Laterns (A). Es wird auch «Fressbädli» genannt, da der Genuss der Quelle guten Appetit macht.

224. Schwefelquellen bei Flums, schon von Scheuchzer (1717) erwähnt.

225. Die indifferenten Quellen von Pfäfers und Ragaz. Die Quellen wurden 1038 das erste Mal entdeckt. Die Wassertemperatur der Quellen liegt bei 37 °C. Analyse durch Pagenstecher vorhanden.

226. Die Heilquelle auf der Alp Palfris in der Nähe von Sargans. Es soll eine Schwefelquelle sein.

227. Die erdige Quelle von Balgach. Analyse durch Dr. Sonderegger, feste Bestandteile 0,313 g/l.

228. Die Quelle des Bleichebades im Eisenried (Entfernung von Altstätten $\frac{1}{4}$ h Fussmarsch). Das Wasser soll namentlich Eisen

und ausserdem salzsaure Salze, kohlen sauren Kalk und Schwefelwasserstoff enthalten.

229. Die Schwefelquelle von Büssing auch Büsnich bei Sax. – Sie entspringt beim Schloss Forstegg, soll nach Schwefelwasserstoff riechen und kalt sein.

230. Die Quelle des Eichbergbades oberhalb des Eichbergs.

231. Die Schwefelquelle auf der Alp Ellabria oder Labrie bei Azmoos. Sie soll einen unerträglichen starken Geruch verbreiten, wird aber nicht genutzt. Unmittelbar unterhalb entspringt ein starker Eisensäuerling.

232. Die Heilquellen von Forstegg. Der Geschmack und Geruch ist stark hepatisch. Das Wasser enthält freie Kohlensäure, Schwefelwasserstoffgas, kohlen sauren Kalk, kohlen saure Magnesia und Extraktivstoff.

233. Die Schwefelquelle des Gempelenbades bei Gams. Die Wassertemperatur beträgt 20 °C bei 13,7 °C Lufttemperatur. Das Wasser ist von moorigem Geschmack, es enthält freie Kohlensäure, kohlen- und salzsauren Kalk und Extraktivstoff.

234. Die Schwefelquelle von Grabs, sie entspringt zwischen Wildhaus und Grabs am Grabsberg. Bei der qualitativen Untersuchung fand Rüschi freie Kohlensäure, Schwefelwasserstoff und salzsaures Natron. Die Quelle wurde schon von Wagner (1680) erwähnt, bildet harten Kesselstein (Kalkablagerungen) und setzt bei der Quelle Schwefel ab. Bei Regenwetter riecht es stark nach Schwefelwasserstoff.

235. Die erdige Quelle von Kobelwies bei Oberried. Der einzige wesentliche mineralische Bestandteil ist kohlen saurer Kalk. Das Wasser enthält viel CO₂ und verursacht starke Kalkablagerungen.

236. Die Schwefelquelle im südlichen Teil von St. Margrethen. Die Quelle enthält etwas Schwefelwasserstoff, schwärzt jedoch das Silber nicht.

237. Die erdige Quelle von Marbach. Sie ist schon seit langem bekannt. Mineralisation wie Nr. 235.

238. Bad bei Rebstein, zwischen Marbach und Balgach. Scheuchzer erwähnt dieses Bad 1717.

239. Die Schwefelquelle des Ransbades

bei Rans. Die qualitative Untersuchung durch Rüschi am 9. Sept. 1827 ergab einen Gehalt an freier Kohlensäure, kohlen- und salzsaurem Kalk. Das Wasser bildet beim Kochen sehr starken braunen Kesselstein.

240. Die Quelle von Sargans, eine Schwefelquelle. Wagner (1680) und Scheuchzer (1717) erwähnen beide diese Quelle. Sie wird aber seit 1800 nicht mehr benutzt. Das Wasser war weiss und hatte einen starken Geruch. Auch im Jahr 2000 vernimmt man im Dorfzentrum von Sargans bei Regenwetter einen deutlichen Geruch nach faulen Eiern.

241. Die Schwefelquellen von Sax. Rüschi erwähnte die Quellen, ihr heutiger Zustand ist unbekannt.

242. Die Quelle von Thal. Rüschi fand nur normales Quellwasser mit kohlensaurem Kalk.

Gruppe des Toggenburgs

243. Bizzibad bei Bütschwil. Normales Wasser, aber mit viel kohlensaurem Kalk.

244. Die alkalische Schwefelquelle des Rietbades bei Ennetbühl. Analyse durch Dr. Nadler, deutlich alkalische Quelle mit Schwefelwasserstoffgeruch, feste Bestandteile 0,285 g/l.

245. Quelle von Ernetschwil, nördlich von Uznach, auch «Fröschenbädli» genannt. Rüschi empfand das Wasser als gewöhnliches Quellwasser.

246. Die Quelle auf der Alp Fosen bei Krummenau. Rüschi hat diese Quelle unter den Schwefelquellen aufgeführt.

247. Die Schwefelquelle von Nesslau, sie entsprang 22 Fuss tief unter der Erde. Rüschi fand 1829 in diesem Wasser Kohlensäure, Schwefelwasserstoffgas, kohlensauren Kalk und Magnesia. Das spez. Gewicht betrug 1,002. Benachbarte Brunnen rochen ebenfalls schweflig.

248. Die Schwefelquelle von Wildhaus. Sie entsprang unterhalb des Dorfes an der Strasse nach Gams. Das Wasser hatte keinen Geruch, aber einen moorigen Geschmack.

249. Säuerliche Quelle am Fusse des Schlossberges von Wildenberg, östlich von Wildhaus. Sie wird von Rüschi aufgeführt, wurde aber nicht benutzt.

Bodenseegruppe

250. Die Stahlquelle von Waldkirch im Bezirk Gossau. Sie entspringt bei der Strasse von Waldkirch nach St. Gallen. Das Wasser setzt Eisenocker ab, feste Bestandteile 0,48 g/l.

251. Die Stahlquelle des Löchlibades, in der Stadt St. Gallen mit viel Kohlensäure, Eisen, Kalk, phosphorsaurer Magnesia und Tonerde.

252. Überlingen (D) besitzt eine gaslose Stahlquelle, die schon seit 1505 bekannt ist. Die durchschnittliche Wassertemperatur beträgt 13–15 °C. Analyse durch Pfeffer (1838), feste Bestandteile 0,483 g/l.

Kanton Thurgau

253. Das Bizzibad in der Nähe von Bishofszell. Es soll gewöhnliches Quellwasser sein.

254. Die erdige Stahlquelle von Luxburg, in der Nähe von Romanshorn, Salmsach und Neukirch nahe dem Schloss Luxburg. Untersuchung durch Prof. Gmelin aus Tübingen (D) und Kantonsapotheker Irminger in Zürich. Feste Bestandteile 0,763 g/l, riecht deutlich nach Schwefelwasserstoff und bildet extrem viel Ocker. Das Wasser enthält sehr viel Eisen, Natriumchlorid, Kalk und viel kohlensaures Gas.

255. Das Heiligbad bei Matzingen, an der Strasse von Frauenfeld nach Wil.

256. Die Quelle des Schrofensbades zwischen Amriswil und Engishofen. Von Wagner (1680) und Scheuchzer (1717) erwähnt. Ihr Gehalt ist unbekannt.

257. Quelle bei Wigoldingen, wurde von Wagner (1680) erwähnt und soll eine Stahlquelle sein.

258. Quelle bei Schönholzerschwil. Sie wurde von Scheuchzer (1717) erwähnt. Das Wasser setzte beim Sieden einen erdigen Niederschlag ab. Es enthielt nur 0,175 g/l feste Bestandteile, das spezifische Gewicht war geringer als das von destilliertem Wasser. Kupferne Gefässe schwärzte es.

Kanton Appenzell

259. Die erdige Stahlquelle des Heinrichsbades nördlich von Herisau. Das Wasser wurde von Rüschi 1827 untersucht, feste Bestandteile 0,374 g/l.

260. Erdige Stahlquelle bei Gonten (Entfernung von Gonten $\frac{1}{2}$ h östlicher Fussmarsch). Am Fusse des Kronberges entspringen vier Heilquellen. Analysen durch Stein 1836 und Löwig, feste Bestandteile 0,321 g/l, etwas freie Kohlensäure.

261. Erdige Stahlquelle des Jakobsbades bei Gonten. Das Wasser ist ähnlich dem Wasser von Gontenbad (Nr. 260).

262. Die erdige Quelle des Weissbades, am Fusse des Alpstockes. Es soll ein kalkhaltiges Brunnenwasser sein.

263. Die Quelle des Bades im Brüggli (Entfernung von Schönggrund $\frac{1}{4}$ h Fussmarsch). Es soll bei trockener Witterung nach Schwefelwasserstoff schmecken.

264. Die erdige Quelle des Dorfbades bei Appenzell. Das Bad existierte bereits vor der Teilung des Kantons 1597. Analyse durch Sulzer, feste Bestandteile 1,736 g/l, es enthält sehr viel Magnesia und Kalksulfat und hat einen erdigen Geschmack. Wird die Wiese gedüngt, so bekommt es einen unangenehmen Geschmack.

265. Die erdige Quelle des Bades Hörnli bei Teufen. Das Wasser bildet beim Kochen einen weissen Schaum und bildet am Kessel eine harte Kruste (Kalkablagerungen).

266. Scheutzenmühlebad (Entfernung von Gais $\frac{1}{2}$ h Fussmarsch).

267. Die Quellen des Schönenbühlerbades bei Wolfhalden, das Bad liegt zwischen Heiden und Wolfhalden. Nach Rüschi sollen hier fünf Heilquellen entspringen. Die eine Quelle schmeckt nach Schwefelwasserstoff und ist stark ablagernd.

268. Die Quelle des Bades im Sonder am südlichen Abhang der Egg oberhalb von Teufen. Rüschi fand, dass sich das Wasser nur durch den grösseren Gehalt an erdigen und salinischen Bestandteilen von reinem Quellwasser unterscheidet.

269. Die Quelle des Bades im Stägbach bei Bühler. Rüschi fand darin nur kohlen- und salzsauren Kalk.

270. Die erdige Quelle des Störgelbades bei Störgel zwischen St. Gallen und Stein. Das Wasser wird beim Sieden milchweiss und setzt eine starke erdige Kruste an.

271. Die Schwefelquelle des Bades Trogen, sie ist seit 1682 bekannt. Die Quelle entspringt aus mehreren Adern aus Mergelsandstein, den schwefelhaltige Steinkohlelager durchziehen. Es enthält vorzüglich Schwefelwasserstoff, kohlen- und salzsauren Kalk.

272. Die Schwefelquelle des Bades von Unterrechstein bei Grub. Es entspringen hier drei Heilquellen aus Sandsteinfelsen. Das Wasser schmeckt und riecht nach Schwefelwasserstoff.

273. Die Quelle des Waldstatterbades, es liegt auf einer torfhaltigen Wiese zwischen Waldstatt und Urnäsch. Die Quelle wurde durch Sulzer analysiert.

274. Die Quelle im Wert bei Heiden. Das Wasser schmeckt leicht tintenhaft, riecht etwas nach Schwefelwasserstoff und setzt Eisenocker ab.

275. Die Quelle des Widenbades im Tal der Urnäsch. Rüschi fand kohlen- und salzsauren Kalk.

276. Die Schwefelquelle des Bades bei Wylen westlich von Herisau. Rüschi untersuchte das Wasser und fand Schwefelwasserstoff, Kohlensäure und salzsauren Kalk, Magnesia und Natron, kohlen-saures Eisenoxydul und Extraktivstoff.

277. Die Schwefelquelle von Bissau bei Heiden (unmittelbar bei Nr. 267). Das Wasser hat einen hepatischen Geruch und etwas salzigen Geschmack. Rüschi fand Schwefelwasserstoff, kohlen- und salzsauren Kalk.

278. Die Quelle in Buchen bei Herisau. Die Quelle wurde von Wagner 1680 erwähnt und riecht sehr stark nach Schwefelwasserstoffgas.

279. Die Schwefelquelle von Erlen bei Speicher. Das Wasser schmeckt tintenhaft und riecht hepatisch. Nach Meyer und Rüschi enthält es Schwefelwasserstoffgas, kohlen- und salzsauren Kalk und Magnesia, Tonerde, Eisen und Extraktivstoff.

280. Die Schwefelquelle in der Gaiserau südlich der Dorfkirche von Gais. Es ist nach Rüschi ein ziemlich kräftiges Eisenwasser.

281. Die Schwefelquelle in Speicher.

282. Die Quelle auf dem Hasenbühl bei Heiden. Sie riecht nach Schwefelwasserstoffgas.

283. Die Natronquelle im Kastenloch (Entfernung des Bades von Trogen [Nr. 271] 15 Min. Fussmarsch). Analyse durch Dr. C. Rahn 1825, feste Bestandteile 0,345 g/l. Ihr Gehalt an wirksamen Stoffen variiert je nach Witterung.

284. Die Quelle bei Oberegg. Es ist eine Schwefelquelle, die nicht genutzt wird.

285. Die Quelle in der Schupfe bei Speicher. Es ist eine nach Schwefelwasserstoff riechende Quelle.

286. Die Quelle im Segholz zwischen Kastenloch und Rehetobel. Sie fliesst aus einem Felsen hervor und riecht stark hepatisch.

287. Der St. Jakobs-Brunnen, eine sehr alte Quelle am Fusse des Kronberges. Rüschi fand kohlen- und etwas salzsauren Kalk.

288. Das Wasser im Guggeloch in einer Schlucht am Fusswege von Gais nach Weissbach bei der Kapelle (Entfernung von Appenzell $\frac{1}{4}$ h Fussmarsch). Rüschi erwähnt diese Quelle als Mineralquelle.

289. Das salinische Wasser im Fuchsloch, in der Nähe von Farnbühl bei Stein in der romantischen Schlucht der Urnäsch. Es enthält kohlen-sauren Kalk und schwefelsaures Natron und setzt an den Felsenwandungen Mondmilch und Glaubersalz ab.

Kanton Graubünden

Vorderrhein

290. Stahlquelle im Val Sumvitg (heute bekannt als Tennigerbad).

291. Peiden Stahlsäuerlinge,

– St. Luzius-Quelle (Trinkquelle), feste Bestandteile 3,055 g/l, freie Kohlensäure 1,679 g/l.

– Frauenquelle (Trinkquelle), feste Bestandteile 4,090 g/l, kohlen-saures Gas 1,250 g/l.

– (Badequelle), feste Bestandteile 3,005 g/l.

292. Gipstherme bei St. Peter im Valsertal (Entfernung von Peiden $\frac{3}{4}$ h Fussmarsch). Das Wasser war kristallhell, weich, fast ölig anzufühlen, geruchlos und von mildem, seifenartigem, kaum eisenhaltigem Geschmack. Analyse durch Capeller, feste Bestandteile 2,19 g/l. Die Wassertemperatur war 17,5 °C bei einer Lufttemperatur von 25,6 °C.

293. Eisenhaltige (ockerabsetzende) Quelle im St. Placidus-Tobel bei Disentis.

294. Die Fernataquelle, auf der Waltensburgeralp am Vepchiaberg (Panixerpass), eine Schwefelquelle. Das Wasser ist sehr kalt und fühlt sich fettig an.

295. Fonteuna cotschna «Rothebrunnen», eine Schwefelquelle bei Vrin. Sie hat den Geruch und Geschmack nach Schwefelwasserstoff und setzt einen rötlichen Niederschlag ab. Sie besitzt einen hohen Gehalt an Eisen und Bittersalz. Das Bittersalz scheint aus dem grauen Schiefer zu stammen (sehr reichhaltig).

296. Eisensäuerling bei Lumbrein, an der Brücke über den Glenner.

297. Schwache Stahlquelle bei Vella. Das Wasser färbt die Umgebung durch einen Niederschlag von Ocker rot.

298. Eine Bittersalz- und eine Eisenquelle, welche bei der Alp Valac, einem Seitental des Valsertals, entspringen soll.

299. Die Schwefelquelle bei Ruschein. Sie wird nicht benutzt.

300. Auf dem Gut Palmartscha bei Valendas soll eine Sauer- und eine Schwefelquelle entspringen.

301. In einer Höhle ob Valendas, wo einst nach Metall gegraben wurde, soll eine Sauerquelle entspringen; ihre Existenz ist jedoch zweifelhaft. Nach Scheuchzer brauchten die Schuster das Wasser dieser Quelle statt die «Kupferschwärze» (Eisenvitriol). Nach Wagner sollte bei Valendas eine Quelle entspringen, deren Wasser fettig anzufühlen war, als wenn es mit Öl gemengt gewesen wäre. Wenn man sich damit wusch, hatte man das Gefühl, als wenn man die Glieder mit Fett oder Öl überzogen gehabt hätte. Vielleicht war es eine sehr starke Natron-

quelle. Die Einwohner von Valendas wollten jedoch schon zu Scheuchzers Zeit (1717) nichts von dieser Quelle wissen.

Hinterrhein

302. Bei Medels in der Nähe von Splügen entspringt eine Sauerquelle.

303. Bei Splügen entspringen drei rotfärbende, schwach eisen- und bittersalzhaltige Sauerlinge.

304. Bei Juf im Averstal entspringt eine sehr stark ablagernde saure Quelle. Sie scheidet Milch beim Kochen.

305. Bei Campsut entspringen zwei warme Quellen.

306. Auf der Alp Starlera im Ferreratal entspringen Mineralquellen. Gamser bezeichnet sie als Sauerlinge.

307. Die Quelle von Pignia. Das Wasser setzt überall viel Eisenerde ab und soll Natron, Magnesia und kohlen-saures Eisen enthalten. Die Wassertemperatur beträgt 19,4 °C bei 13,8 °C Lufttemperatur.

308. Auf der Alp Arosa oberhalb Andeer soll eine Mineralquelle entspringen sein.

309. Bei Thusis entsprang eine kalte Schwefelquelle, welche von der Nolla verschüttet wurde. Rüschi fand in dem Wasser 1827 feste Bestandteile von 0,578 g/l.

310. Quelle von Rothenbrunnen, feste Bestandteile 0,756 g/l.

311. Quellen von Tomils. Das Wasser hat einen säuerlichen, salzigen, zusammenziehenden Geschmack. Rüschi fand darin freie Kohlensäure, kohlen-saures Eisenoxydul, kohlen- und schwefelsauren Kalk und Magnesia, Natron und Extraktivstoff.

312. Sauerquelle beim Rhäzünserstein bei Rothenbrunnen. Die Quelle ist den Überschwemmungen des Rheins ausgesetzt. Es steigen Gasblasen aus dem Wasser auf.

313. Bei Ems (Domat/Ems), gegenüber dem Schloss Rhäzüns am rechten Ufer des Hinterrheins, befand sich eine Quelle gleichen Charakters wie jene von Rothenbrunnen. Sie wurde vom Rhein verschüttet.

Albulatal und Seitentäler

314. Eine Schwefel- und zwei Eisenquellen im Sertigtal. Am Ende des Tales soll eine

Schwefelquelle entspringen sein, nahe derselben eine Eisenquelle. Nahe bei Sertig stand ein Badehaus, welches 1762 weggeschwemmt wurde. Es war hier eine Schwefelquelle, die stark benutzt wurde.

315. 1860 befand sich in Clavadel ein Badehaus, in dem eine leichte Schwefelquelle benutzt wurde.

316. Spina- oder Rieternbad, auch Spinnerbad genannt bei Spina oberhalb Glaris. Die Schwefelquelle entspringt in der Rineralp, $\frac{1}{2}$ h Fussmarsch über dem Bad. Das Wasser schmeckt und riecht nach Schwefelwasserstoff. Beim Kochen bildet sich ein fettiger schmieriger Schlamm.

317. Bei Alveneu entspringt eine gips-haltige Schwefelquelle. Die Quelle verbreitet den Geruch von Schwefelwasserstoff. Analyse durch Planta, feste Bestandteile 1,268 g/l.

318. Ein Sauerling soll, $\frac{1}{2}$ h unterhalb des Bades Alveneu gegen Surava hin, entspringen sein. Die Quelle soll verschüttet worden sein. Dagegen entspringen in einer sumpfigen Wiese innerhalb des Dorfes Surava drei ziemlich reiche Schwefelquellen.

319. Auf der Wiese Solis gegenüber Filisur soll eine rot färbende Quelle entspringen. Sie enthält etwas Eisen, schwefelsauren Kalk, Magnesia, eine Spur Kali und etwas Kohlensäure.

320. St. Peters-Quelle bei Tiefencastel, ein Stahlsauerling. Analyse durch Planta, feste Bestandteile 4,494 g/l.

321. Donatusquelle von Solis bei Tiefencastel. Es entspringt hier eine jodhaltige Natronquelle mit Eisen. Analyse durch Planta, feste Bestandteile 4,598 g/l.

Albulatal

322. Quelle oberhalb von Stierva. Das Wasser wirkt auf die Milch wie Lab, so dass ein mit diesem Wasser gekochter Kaffee die Milch bricht. Der Geschmack liess Brügger auf einen bedeutenden Gehalt an Bittersalz schliessen.

323. Schwefelquelle oberhalb Lenz, gegen den Fuss des Lenzerhorns. Die Quelle ist ungenutzt und vermischt sich mit Sumpfwasser auf einer Sumpfwiese.

324. Im Val Tuors (Entfernung von Bergün $\frac{1}{2}$ h Fussmarsch) entspringt eine Schwefelquelle, welche von den Umwohnern benutzt wird.

325. Eine Schwefelquelle bei Bergün, sie fliesst ungenutzt in die Albula. Ganz nahe dieser Quelle soll eine Stahlquelle entspringen; sie soll zuweilen benutzt werden.

326. Bei Rieven, so heisst der untere, an der Julierstrasse gelegenen Teil des Dorfes Rona, am linken Ufer der Gelgia im Tal Oberhalbstein, nicht weit unterhalb der nach Tinizong führenden Brücke, entspringt ein Stahlsäuerling, welcher die nächste Umgebung durch einen reichlichen Niederschlag von Ocker rot färbt.

327. Im Ronaerried innerhalb der Säge entspringt eine Schwefelquelle, die einen starken hepatischen Geruch verbreitet. Früher stand hier ein Bad.

328. In der Ochsenalp oberhalb von Tinizong, ganz nahe beim alten Bergwerk und bei Savognin im Val Nandro, sollen Sauerwasser entspringen.

Tal des vereinigten Rheines und Seitentäler

329. Mineralquellen bei Peist (Graggenbad genannt). Sie hat den Geschmack nach Eisen und Bittersalz.

330. Tamins, Scheuchzer (1717) erwähnt eine sehr wasserreiche Quelle, die im Winter nicht gefror. Die Quelle existiert noch und speist alle Dorfbrunnen, dient zum Bewässern und betreibt viele Wasserwerke.

331. Wilhelmsbad (Entfernung von Chur $\frac{1}{2}$ h Fussmarsch), am Abhang des Mirtenberges unterhalb Maladers, entspringt eine unbedeutende kohlen säurehaltige, schwefel-, und kohlen sauren Kalk und Magnesia enthaltende Quelle. Wahrscheinlich enthält die Quelle Eisen, da sie nach Gamser Eisenocker absetzt. Sie wird nicht mehr benutzt.

332. Sauerquellen in der Nähe von Chur, Rabiosa (Arasga) und Balvedra, es sind dies Sauerquellen. Analyse von Capeller, feste Bestandteile 1,692 g/l, kohlen saures Gas 3,125 g/l. Die Quellen gingen verloren (wurden verschüttet) und wurden erst 1826 neu gefasst. Aus dem Grunde stiegen beständig Gasblasen hervor.

333. Bei Malix entspringt eine Schwefelquelle, welche mehr Schlamm absetzt als die Quelle von Alveneru.

334. Bei Cadveders, auf einer sumpfigen Bergwiese am Churwallerberg, entspringt eine schwache Schwefelquelle.

335. Zwei Quellen bei Haldenstein. Eine entspringt in der Nähe der Schlossruine Haldenstein. Die zweite, welche auch Bittersalz enthalten soll, entspringt in der Höhle des Schlosses Grottenstein. Scheuchzer erwähnt schon 1717 eine Quelle, die oberhalb Haldenstein entspringen soll.

336. Quelle zwischen Untervaz und der Tardisbrücke bei den Trümmern des alten Rittersitzes Friewies, am Fusse des Calanda. Die Quelle war schon im 17. Jahrhundert bekannt. Es ist dies ein reines Wasser mit 5,5 °C.

337. Ähnlich gemeines Wasser wie bei Nr. 336 entspringt in der «Gerbe» unterhalb Zizers, 50 Fuss über dem Rhein in einer künstlichen Grotte. Es setzt einen rötlichen Schlamm ab.

338. In der Jeninseralp bei Jenins fand Scheuchzer eine kalte Quelle, welche wie ähnliche Quellen «kaltes Bad» genannt wurde.

339. Fläscherbad (Entfernung von Fläsch 1 h westlicher Fussmarsch) am Fusse des Fläscherbergs. Das Wasser sprudelt aus zwei Spalten in eine künstliche Grotte, setzt eine geruch- und geschmacklose tuffsteinartige Materie ab und wird beim Sieden milchweiss. Rüschi (1827) glaubte, es handle sich um kohlen saure Salze, namentlich kohlen sauren Kalk und kohlen saures Natron. Das Bad soll schon im 5. Jahrhundert benutzt worden sein.

Prättigau

340. Bei Schabersau in der Umgebung von Fideris, auf dem Weg von Fideris nach Küblis, entspringt eine kalte Schwefelquelle. Es ist keine Mineralquelle, wurde aber zum Baden verwendet.

341. Auf der Fideriseralp und zwischen dem Bad und dem Dorf Fideris entspringen Säuerlinge.

342. Bei der Tobelmühle nicht weit von Fideris, nahe den Trümmern von Strahlegg entsprang eine Eisenquelle.

343. Das Schwefelwasser von Klosters. Die qualitative Untersuchung ergab einen Gehalt an freier Kohlensäure, Schwefelwasserstoffgas, kohlensaurem Kalk und Extraktivstoff. Sie hat einen starken hepatischen Geruch und Geschmack.

344. Bei Conters i. Pr. entspringt eine Sauerquelle, die bei der Fusstauchmühle unbenutzt in den Bach fliesst. Es befand sich in Conters ein Bad, welches sein Wasser von einer angeblichen Schwefelquelle erhielt.

345. In der Saaseralp soll sich eine Schwefelquelle befinden. Nach Gamser quillt unterhalb von Saas i. Pr. in einer Küblis gegenüberliegenden Bergwiese ein Sauerling hervor.

346. Bei Küblis, am linken Ufer der Landquart, entspringt ein Sauerling, der Eisenocker absetzt. Rüschi fand, dass sich das Wasser wie bei Tomils (rote Markierung Nr. 96) verhielt.

347. Bei St. Antönien entspringen verschiedene Mineralquellen, welche ihren Standort laufend wechseln. Im Jahr 1832 fanden sich die drei folgenden Quellen. 1) Die Quelle auf dem Badried in der Rifeni nahe der Kirche bei St. Antönien. Es war ein kräftiger, einen roten Niederschlag bildender Sauerling. 2) Die Quelle in der Scherre beim Zusammenfluss des Schnöler- und Mutnerbaches. Ähnlich wie die erste Quelle, floss aber reichlicher. 3) Die Quelle auf Aschuel in einer Felsenschlucht des Weilers Aschuel. Es war eine seifenartige, schöne, starke, nie gefrierende Quelle, die Harz und andere Unreinigkeiten besser entfernte als Seife. Der Genuss war Menschen und Tieren angenehm.

348. Die ungenutzte Quelle von Jenaz. Sie entspringt im Val Davo aus dem nahen, aus Quarz und Tonschiefer bestehenden Gebirge. Der Geschmack war fettig oder nach andern tintenhaft oder alkalisch. Das Wasser färbte Silber gelb. Bauhoff fand 1827 feste Bestandteile von 0,39 g/l.

349. Ganeybad am Südhang des Schesaplana (Entfernung von Seewis 1 h Fussmarsch). Vier Quellen, eine Schwefelquelle und nach Scheuchzer je ein Sauer- und ein Salzwasser, also beides Sauerlinge. Über die

letzte Quelle liegen keine Angaben vor. Drei Quellen existierten noch 1860, wobei eine den Geruch von verbranntem Schiesspulver hatte und deutlich Blasen aufstiegen.

Südlicher Talerzug Engadin

350. Die eisenhaltigen Sauerlinge (grösstenteils Natronsauerlinge) von St. Moritz.

– Alte Quelle, Analyse durch Planta, Kekulé und Capeller

– Paracelsusquelle, Analyse durch Planta, Kekulé und Capeller

– dritte Quelle, Analyse durch Mosmann

– vierte Quelle, 1865 entdeckt, es existiert noch keine Analyse.

351. Die eisenhaltigen Sauerlinge (grösstenteils Natronsauerlinge), die Schwefelquelle und Mofetten von Schuls-Tarasp:

Natronsauerling (sogenannte Salzwasser)

– Die grosse Quelle oder St. Luzius-Quelle zu Tarasp (bei Vulpera)

– Die kleine Quelle oder St. Emerita-Quelle zu Tarasp (Vulpera)

– Schulser Salzwasser oder Ursusquelle bei Nayrs

– Neue Badequelle

Eisensauerlinge (sogenannte Sauerwasser)

– Die Wyhquelle oder Campellsquelle auf Wyh bei Oberschuls

– Suot-Sassquelle oder St. Florentins-Quelle bei Oberschuls

– Die Tarasper Sauerquelle im Val Zuort oder Bonifaziusquelle

– Die Karolaquelle (früher als Brückensauerling bezeichnet)

– Runnaquelle

– Talurquelle

– Rimmasquelle

– Baraiglaquelle

Schwefelwasser

– Schwefelquelle im Val Plavna (Val-latschtobel) oder Tarasper Schwefelquelle

Mofetten oder Gasquellen zwischen Schuls und Ftan

352. Die arsen- und eisenhaltigen Natronsauerlinge im Val Sinestra, bei Ardez und bei Ftan. Angebliche Schwefelquellen. 12–15 Quellen entspringen 10 Min. auseinander im

Val Sinestra gegenüber Manas. Zwei Analysen von Killias sind vorhanden.

353. Ziemlich reiche Stahlquelle im vorderen Teil des Val Fex südlich von Sils. Das Wasser setzt Ocker ab. Brügger fand das Wasser 1855 von unbedeutendem mineralischem, jedoch sehr deutlich tintenhaftem Geschmack.

354. Schwefelquelle bei Sils, östlich von Maria, in der Ebene gegen den See von Silvaplana und bei der Säge.

355. Schwefelquelle bei Samedan, in einer Sumpfwiese hinter dem mittelalterlichen Gefängnisturm. Das Wasser enthält schwefelsauren Kalk in bedeutender und Eisen in geringer Menge.

356. Eine Schwefelquelle bei S-chanf. Brügger schloss nach dem Geschmack des Wassers auf grossen Gehalt an Bittersalz und Eisen.

357. Schwefelquelle von Celerina. Sie entspringt westlich von Cresta am Wege zu St. Moritz. Ausserdem liest man noch von einer Schwefelquelle, die in Celerina entspringen, aber versiegt sein soll.

358. Schwacher Sauerling in einer Sumpfwiese beim halbverschütteten Surlej, gegenüber Silvaplana.

Misoxtal

359. Der Stahlsauerling von St. Bernardino, feste Bestandteile 3,136 g/l.

Münstertal

360. Eisenquelle zwischen Valchava und Fuldera, am Fusse eines Berges, welche in den Rio Ramm fliesst. Von Scheuchzer (1717) erwähnt. Überzieht alles, worüber es fliesst, mit einem roten Niederschlag.

361. Drei Schwefelquellen nördlich der Kirche von Tschier. Sie sind nicht gefasst und werden stets vom Il Rom verschwemmt. Sie haben einen starken Geruch nach Schwefelwasserstoff.

Puschlavtal

362. S. Carlo im Poschiavotal. Es entspringt hier ein Sauerling.

363. Selva im Poschiavotal. Es entspringt hier ein Sauerling.

Das Bergell

364. Alp Alpigna oberhalb Vicosoprano. Es entspringt hier ein schwacher ockerabsetzender Sauerling.

365. Eine verschüttete Mineralwasserquelle soll bei Soglio entspringen sein.

366. Eine verschüttete Mineralwasserquelle soll bei Casaccia entspringen sein.

Anhang

367. Die Gipsthermen von Bormio (I), 8 Thermen

– Die St. Martins-Therme, 39 °C, 50 l/min, feste Bestandteile 1,026 g/l

– Die Therme der Erzherzogin oder «Frauenheil», 39,7 °C

– Der Kleinkindersprudel

– Die Cassiodortherme oder Cassiodora

– Der Pliniusborn oder Pliniana, Sinterablagerungen von kohlen-saurem und schwefelsaurem Kalk und Magnesia, 36,5 °C

– Die Ostgothentherme

– Der Nibelungenborn

– Die Augenquelle oder der sogenannte St. Karls-Brunnen.

368. Sta. Catarina-Valfurva im Valfurva. Es entspringt hier ein eisenhaltiger Natron-sauerling. Analyse von Peregrini, feste Bestandteile 0,858 g/l. Das Wasser prickelt stark und ist von tintenhaftem Geschmack. In geringer südlicher Entfernung zur Hauptquelle entspringt ein zweiter Sauerling.

369. Die salinisch-muriatische Therme von Masino (I) in einem Seitental des Val Masino nahe bei San Martino. Das Bad ist schon seit 1545 bekannt. Das Wasser ist klar, geruchlos und von salzigem Geschmack. Es hat eine konstante Temperatur von 35 °C. Analyse durch Demagri, feste Bestandteile 0,819 g/l.

370. Stahlsauerling von Obladis (A). Analyse durch Albaneda (1836) und Halsiwetz (1856), feste Bestandteile 1,872 g/l, Wassertemperatur 8,1 °C.

Kanton Tessin

371. Die Schwefelquellen von Stabio mit Schwefelkalzium, feste Bestandteile 1,147 g/l.

372. Der Stahlsäuerling von Rovio. Der Geschmack des Wassers ist adstringierend tintenhaft. Es enthält kohlen saure Eisen, kohlen sauren Kalk, kohlen saures Magnesia, Chlormagnesium und Chlorkalzium, feste Bestandteile 1,73 g/l, freie Kohlensäure 0,54 g/l.

373. Der Stahlsäuerling von Lugano, im Garten der Villa Enderlin. Das Wasser hat eine konstante Temperatur von 16,3 °C. Es enthält nach Ferrario (1844): kohlen saures Eisenoxydul 0,245 g/l, kohlen sauren Kalk 0,088 g/l, Chlormagnesium 0,05 g/l, Chlorkalzium 0,03 g/l, Chlornatrium 0,105 g/l, schwefelsaure Magnesia 0,05 g/l, schwefelsaures Natron 0,085 g/l, schwefelsauren Kalk 0,12 g/l, Extraktivstoff 0,055 g/l, Kieselsäure 0,1 g/l; feste Bestandteile 0,928 g/l; freie Kohlensäure 0,122 g/l.

374. An der Strasse nach Agno (Entfernung von Lugano $\frac{1}{4}$ h Fussmarsch) entspringt eine stark eisenhaltige Quelle, welche sehr viel Eisenocker absetzt.

375. In der Umgebung von Meride, nordwestlich von Mendrisio, sollen einige Mineralquellen entspringen.

376. In der Nähe des Sees von Muzzano südwestlich von Lugano entspringt eine Quelle, deren Wasser eisenhaltig ist.

377. Bei Montagnola südwestlich von Nr. 376 entspringt eine Quelle, deren Wasser eisenhaltig ist.

378. Bei Magliaso am westlichen Arm des Luganersee entspringen mehrere Mineralwasserquellen. Die Analyse einer Quelle ist vorhanden. Sie hat einen starken Geruch nach Schwefelwasserstoffgas.

379. Im Malcantone entspringen mehrere Mineralwasserquellen.

380. Quelle mit Eisen oberhalb Novaggio. Unterhalb Novaggio entspringt eine Quelle, die einen Safrangeschmack hat. Jemand, der von ihrem Wasser trank, bekam hartnäckiges Erbrechen. Es scheint daher, dass dieses Wasser freies Jod enthält.

381. Quelle in der Umgebung von Astano, westlich von Novaggio, auf dem Wege zwischen Astano und Bombinasco. Das Wasser hatte einen styptischen Geschmack.

382. Quellen bei Curio, südöstlich von Novaggio. Eine Quelle mit bitterem Geschmack und eine andere Quelle riecht und schmeckt nach Schwefelwasserstoff.

383. Eine Quelle im Gebiet des südwestlich von Novaggio gelegenen Dorfes Castelrotto unterhalb Ronco, die schwefelhaltig sein soll.

384. Eine Quelle bei Croglgio, sie hat einen eisenhaften Geschmack und einen eisenhaltigen Niederschlag. (Das Wasser ist ähnlich der Quelle von Nr. 383.)

385. Die Quelle in der Nähe von Gravesano, 5 km nordwestlich von Lugano. Analyse durch Ferrario, feste Bestandteile 0,295 g/l, freie Kohlensäure 0,14 g/l. Die Quelle hat eine konstante Temperatur von 15 °C.

386. Ein eisenhaltiger Säuerling oberhalb von Manno, südlich von Gravesano. Das Wasser setzt einen gelbroten Niederschlag ab.

387. Bei Tesserete im Capriascatal entspringt ein Eisensäuerling. Die Quelle wurde von Ferrario untersucht.

388. Kalter Bach oberhalb von Sonvico im Collatal nördlich von Lugano. Die Quelle ist an mineralischen Bestandteilen ziemlich arm.

389. Verschiedene Quellen, auf dem Wege von Bironico nach Medeglia, auf der Strasse von Lugano nach Bellinzona. Sie bilden einen gelbroten Niederschlag von Eisenoxyd.

390. Zwischen Magadino und Vira am linken Ufer des Lago Maggiore entspringen Quellen, die im Winter eine mittlere Temperatur behalten und deren Wasser einen gelbroten Niederschlag absetzt und den Geruch nach faulen Eiern verbreitet.

391. In der Nähe von Brissago am rechten Ufer des Lago Maggiore entspringen einige Quellen mit den gleichen Eigenschaften wie bei Nr. 390.

392. Eine Quelle, 1 Meile von Locarno beim Eingang in ein romantisches Tälchen mit dem Fluss Ravegna, färbt den Boden ockergelbrot. Im Sommer steigen Gasblasen aus dem Wasser auf. Der Geschmack ist styptisch-metallisch, leicht eisenhaft und stechend. Analyse durch Ferrario: feste Bestandteile 0,26 g/l.

393. Quelle bei der Kirche des Berges Dell'Addolorata, oberhalb von Brissago. Hier entspringt ein Bach, der einen gelblichen Niederschlag absetzt. Analyse vorhanden, feste Bestandteile 0,195 g/l.

394. Die Vitriolquelle von Aquarossa. Das Wasser bildet auf Wurzeln u. dgl., über die es fließt, zierliche Stalaktiten und Stalagmiten, die aus Tonerde, Eisenoxyd, kohlen-saurem Kalk und Kieselsäure bestehen. Analyse durch Ferrario; kohlen-saurer Kalk 0,265 g/l, kohlen-saures Eisenoxydul 0,325 g/l, Chlormagnesium 0,11 g/l, Chlorkalzium 0,19 g/l, Chlornatrium 0,24 g/l, schwefelsaure Tonerde 0,84 g/l, schwefelsaures Eisenoxydul 0,235 g/l, schwefelsaure Magnesia 0,275 g/l, schwefelsaures Natron 0,195 g/l, schwefel-sauren Kalk 0,105 g/l, organische Stoffe 0,06 g/l, Kieselsäure 0,05 g/l, feste Bestandteile 2,89 g/l, freie Kohlensäure 0,26 g/l.

395. Die salinische muriatische Stahl-quelle von Ossasco im Bedrettotale oberhalb und südwestlich von Airolo. In dem Wasser schwimmen dünne, eckige, halb durchscheinende Blättchen, die bei auffallendem Licht eine braungrüne Farbe haben, im reflektierten Licht metallisch in Regenbogenfarben schimmern und einer Alge aus der Familie der Ulvaceen angehören dürften. Analyse durch Ferrario 1843: kohlen-saurer Kalk 0,13 g/l, kohlen-saures Eisenoxydul 0,103 g/l, kohlen-saure Magnesia 0,4 g/l, Chlormagnesium 0,165 g/l, Chlorkalzium 0,29 g/l, Chlornatrium 0,1 g/l, schwefelsaure Magnesia 0,705 g/l, schwefelsaures Natron 0,123 g/l, schwefelsaurer Kalk 0,065 g/l, Extraktivstoffe 0,125 g/l, Kieselsäure 0,05 g/l, feste Bestandteile 2,255 g/l, freie Kohlensäure 0,36 g/l.

396. Eine eisenhaltige Quelle bei Rodio südöstlich von Quinto.

397. Mineralquelle bei Piotta oberhalb Quinto.

398. Quelle in der Nähe von Airolo im Tal Bagnera (Quelle von San Carlo), schon von Scheuchzer (1717) erwähnt. Sie setzt einen gelbroten Niederschlag ab (sulfathaltig).

Kanton Neuenburg

399. Die eisenhaltige Quelle von La Brévine, schon von Scheuchzer (1717) erwähnt. Sie überzieht den Grund mit rotfarbigem Absatz. Analyse durch Pagenstecher 1827, feste Bestandteile 0,33 g/l. (Zu Scheuchzers Zeit [1717] entsprangen in der Brévine hin und wieder säuerliche Stahlquellen.)

400. Die eisenhaltigen und Gasquellen bei Les Brenets. Bei der Gasquelle entwickeln sich entzündliche Gase. Diese Gasentwicklung ist permanent. Die Quelle 1 liefert in 24 h beinahe 8 m³ Gas. (Ähnlichkeit mit der Quelle von Billers in (F), feste Bestandteile 1,641 g/l.)

401. Die Quelle von St-Blaise. Zinkgraff fand in dem Wasser vorwiegend kohlen-sauren Kalk, Spuren von Eisenoxydul, kohlen-saure Magnesia und phosphorsauren Kalk in geringen Mengen.

402. Die Quellen in der Nähe von Brot-Dessus und Brot-Dessous, sie wurden von Rüschi erwähnt. Eine schwefel- und eine eisenhaltige Quelle (eisenhaltige Quelle evtl. dieselbe wie Les Ponts-de-Martel).

403. Die Quelle bei Cernier, sie wurde von Scheuchzer und Rüschi erwähnt. Ob diese existierte, ist nicht sicher, jedoch existieren zwei Schwefelquellen bei Fontaines, die eine färbt den Boden schwarz und riecht nach faulen Eiern, die andere hat einen schwachen Geruch und Geschmack nach Schwefelwasserstoff.

404. Quelle beim Schloss Colombier. Es soll hier einst eine Salzquelle entsprungen sein.

405. Quelle von Combe-Girard, am Ende von Le Locle. Der Geruch ist leicht moorig, der Geschmack deutlich eisenhaft. Analyse durch Desfosses 1824; feste Bestandteile 0,314 g/l.

406. Die Quelle von Cortaillod. Eine eisenhaltige Quelle, die einen ockergelben Niederschlag absetzt.

407. Die Quelle von Fleurier. Sie wurde von Rüschi als eisenhaltige Schwefelquelle aufgeführt.

408. Die Quellen von Les Ponts-de-Martel. Eine Quelle verbreitet den Geruch von

Schwefelwasserstoff und wurde von Kopp analysiert, feste Bestandteile 0,5 g/l.

Kanton Jura und Berner Jura

409. Die Gipsquelle von Bellerive. Sie hat einen merklich salzig bitteren, etwas unangenehmen Geschmack, Hauptbestandteile: Gips und Bittersalz. Die Quelle war schon zur Zeit der Römer bekannt. Analyse durch Peter Merian in Basel, ca. 3 g/l feste Bestandteile, davon viel Kalzium- und Magnesiumsulfat.

410. Quelle bei Bözingen. Sie wurde von Wagner (1680) erwähnt.

411. Quelle des Bäderbades oder Bades von Péry. Ein Bad existierte nur 33 Jahre und wurde im Jahre 1856/57 abgetragen.

412. Quelle von Burg bei Laufen. Die Quelle ist schon seit 550 Jahren (1860) bekannt, liefert 120 Schweizermass per Minute und ist geruch- und geschmacklos.

413. Quelle von Champoz, am Fusse des Moron. Sie wurde im Jahre 1700 von Zwinger untersucht.

414. Quelle in der Grotte des hl. Kolumbus bei Undervelier. Die Quelle hat sich mit der Zeit in eine Tuffablagerung gehüllt, welche sie von der Wölbung der Grotte bis ins Bassin begleitet.

415. Quelle bei Cormoret. Sie soll vom Apotheker Fueter untersucht worden sein.

416. Quelle bei St-Imier. Sie wurde von Scheuchzer (1717) erwähnt. Das Wasser ist geruch-, geschmack- und farblos und scheint normales Quellwasser zu sein.

417. Quelle bei Wiedlisbach. Es soll Eisenoxydul, kohlensaurer Kalk und Chlor-kalzium enthalten. Die Badewäsche wird erst nach längerem Gebrauch gelb gefärbt. Sie liefert 25 Schweizermass per Minute.

418. Quelle des Lengnauer Bades, bei Lengnau. Es soll kohlen- und schwefelsaurer Kalk, Magnesia und etwas Eisen enthalten. Es setzt beim Kochen ein gelbliches Sediment ab.

419. Das Bad Reuchenette in der Nähe von Péry.

420. Quelle zwischen Vicques und Rebeuvelier. Sie soll gegen Brustschmerzen heilsam sein.

Kanton Solothurn

421. Die Quelle von Kyburg. Das Wasser hat einen starken Tintengeschmack und setzt Eisenocker ab.

422. Die Quellen des Bades Lostorf. Es sind Gipsquellen und salinisch-muriatische Schwefelquellen mit Schwefelkalzium. Analyse durch Bolley 1864: feste Bestandteile 2,356 g/l (alte Quelle). Neue Quelle 4,685 g/l.

423. Die erdige Quelle des Bades von Attisholz bei Attiswil. Es schmeckt fade und setzt einen rötlichen Niederschlag ab. Die qualitative Untersuchung ergab einen Gehalt an kohlensaurem Kalk, Schwefel- und salzsauren Salzen nebst einer Spur von Schwefelwasserstoffgas und Kohlensäure. Die Wassertemperatur beträgt 15,6 °C bei einer Lufttemperatur von 7,5 °C. Die Quelle war schon zur Zeit der Römer bekannt.

424. Stahlquelle bei Flüh. Das Wasser enthält etwas Eisen, Kalk und Spuren von Chlor. Es setzt sich Badestein und ein grüner Schlamm ab.

425. Die erdige- und die Stahlquelle des Bades Grenchen. Es scheint, dass schon zur Zeit der Römer in dieser Gegend berühmte Bäder existierten. Analyse durch Pfluger 1820, feste Bestandteile 0,31 g/l.

426. Die Gipsterme des Bades Meltingen. Das Wasser setzte einen blass-rötlichen, gelben Kesselstein in grosser Menge ab. Analyse durch Stählin 1826, feste Bestandteile 2,05 g/l.

427. Die Quelle des Bades Niederwil oder Siggernbad bei Niederwil.

428. Die Heilquelle des Bades Waldegg oder Waldeck, kohlensaurer- und schwefelsaurer Kalk, etwas salzsaures Natron, Extraktivstoff und freie Kohlensäure. Schmeckt fade und riecht nach verbranntem Schiesspulver.

429. Salzquellen bei Selzach, die dem Dorf den Namen gegeben haben, sind jedoch schon lange verschwunden.

430. Heilquelle, welche aus dem Fels des Pfarrhauses bei Büsserach entsprang und bräunliches Wasser lieferte. Sie wurde von Hafner 1666 erwähnt.

431. Quelle von Mümliswil im Gulden-tal. Sie wird schon lange nicht mehr benützt.

Kanton Basel

432. Die Solquelle von Schweizerhalle. Analyse der Sole durch Bolley, kohlenaurer Kalk 0,109 g/l, kohlenaurer Magnesia 0,035 g/l, schwefelsaurer Kalk 4,358 g/l, schwefelsaurer Magnesia 0,295 g/l, schwefelsaures Kali 0,132 g/l, schwefelsaures Natron 0,048 g/l, Chlornatrium 239,169 g/l, Kieselsäure 0,017 g/l, Spuren von Tonerde und Eisen, feste Bestandteile 244,163 g/l, freie Kohlensäure 30,5 CC.

433. Quelle des Bades Bubendorf. Ein süßes Wasser, der Geschmack erdig-adstringierend. Analyse durch Stählin 1826, feste Bestandteile 0,306 g/l.

434. Die salinische Gipsquelle des Bades Eptingen. Analyse durch Stählin 1826, feste Bestandteile 0,924 g/l.

435. Quelle des Bades Schauenburg. Die Quelle setzt ziemlich dicken Tuffstein ab.

436. Die Quelle des Bades in der Alp oder Alpbades bei Sissach. Die Quelle enthält hauptsächlich kohlen- und schwefelsauren Kalk, letzterer dem Wasser den süßlichen Geschmack und die abführende Wirkung eines verdünnten Bitterwassers gibt, aber das Wasser zur Kaffeezubereitung untauglich macht, da es die zugesetzte Milch zum Gerinnen bringt.

437. Die Quellen von Arisdorf. Es sind zwei Schwefelquellen, deren Zustand unbekannt ist.

438. Die Quelle des Bades von Arlesheim, Gehalt unbekannt.

439. Schwefelquelle in der Stadt Basel. Sie soll zur Zeit von Felix Platter existiert haben und wurde auch von Wagner (1680) erwähnt.

440. Quelle an der Gerbergasse in Basel. Sie entspringt am St. Leonhards-Berg und ist in den Act. Philosoph. der königl. Gesellschaft in England vom Jahr 1665/66 erwähnt.

441. Brandolphsbrunnen in Basel, ebenfalls in den Act. Philosoph. erwähnt und sollte ein «campherartiges eintrocknendes Prinzip» enthalten.

442. Brunnen zum Brunnen in Basel, ebenfalls in den Act. Philosoph. erwähnt, soll jedoch nur ein Trinkwasser sein.

443. Die Quelle von Brüglingen. Sie entspringt bei der Kapelle St. Jakob an der Birs und soll eine Sauerquelle gewesen sein.

444. Die Quelle des Bades Ettingen. Sie wurde von Wagner (1680) erwähnt.

445. Die Quelle des Bades Kienberg bei Gelterkinden. Ein reines frisches Bergwasser ohne wesentliche feste Bestandteile.

446. Quelle von Gundeldingen. Sie färbte das sandige Terrain hochrot. Das Wasser schmeckte schwach adstringierend.

447. Quelle des Neubades, auch Quelle von Holee genannt, Holee ist ein Weiler von Binningen. Sie wurde im Jahre 1742 von Dr. B. Stählin entdeckt und beschrieben. Der Gehalt der Quelle ist nicht bekannt.

448. Zwei Quellen in der Schafmatt bei Oltingen. Die untere Quelle färbt Fische bräunlich-rot, die obere Quelle überzieht alles mit einem braunweissen harten Tuffstein, sie soll neben erdigen Teilen auch Eisen und Schwefel enthalten.

449. Die Quelle des Bades Oberdorf. Die Quelle soll schon im Jahre 1519 gefasst worden sein.

450. Die Quelle des Ramsachbades bei Läufelfingen. Die Quelle entspringt in einer Gegend, in der sich bedeutende Gipslager befinden. Sie scheint schwefel- und kohlenaurer Kalk zu enthalten.

451. Quelle des Waidholdenbades bei Maisprach. Das Wasser setzt bei längerem Stehen braunen Eisenocker und eine weisse, wie Ton anzufühlende Materie in reichlicher Menge ab.

452. Quelle des Bades Oedental (Entfernung von Rothenfluh $\frac{1}{4}$ h Fussmarsch). Während der Dubach und die meisten ihn speisenden Quellen so kalkhaltig sind, dass sie ordentliche Tuffsteinbrüche erzeugt haben, besitzt das Bad eine sehr reiche kalte Quelle, die sich nach einer Analyse von Dr. Bülacher in Basel durch ihre gänzliche Reinheit von schwefelsauren Salzen, Chlorverbindungen, auch anderen Salzen sowie auch organischen Stoffen auszeichnet. Dagegen enthält das Wasser kohlenaurer Kalk mit schwachen Spuren von Magnesia. Doch beträgt die Menge der letzteren Verbindungen nur 0,025 g/l.

Kanton Aargau

453. Die erdige Stahlquelle des Gränichenbades bei Gränichen. Das Wasser hat einen leichten Geruch nach Schwefelwasserstoff, feste Bestandteile 0,365 g/l. Enthält sehr viel freie Kohlensäure.

454. Die Quelle des Lauterbachbades bei Oftringen. Das Wasser ist mit gutem Brunnenwasser vergleichbar.

455. Die erdige Quelle des Römerbades bei Zofingen. Feste Bestandteile 25,552 g/l, davon salzsauren Kalk und salzsaures Natron 2,428 g/l, salzsaures und kohlenensaures Natron 0,698 g/l, kohlenensauren Kalk und kohlenensaure Magnesia ca. 22,4 g/l. Zudem Sauerstoff, Stickstoffgas und Kohlensäure.

456. Die erdigen Quellen von Schwarzenberg bei Gontenschwil. Analyse durch Bauhoff und später durch Bolley, feste Bestandteile 0,291 g/l.

457. Die Quelle von Gontenschwil. Analyse durch Hirschanter.

458. Die erdige Quelle des Bades bei Unterentfelden. Analyse durch Dr. Meyer 1826.

459. Als sehr kalte Quelle wird erwähnt: Die Quelle des Schongauer oder Mädchenbades bei Schongau (LU). Nach der Angabe des Arztes Kappeler in Luzern soll diese Quelle alkalisch sein.

460. Wagner erwähnt (1680) noch einen St. Burkhard-Brunnen in der Pfarrei Beinwil, nach dem Pfarrer Burkhard, der im 11. Jahrhundert Pfarrer in Beinwil war.

461. Die Schwefelthermen von Baden. Total 21 Quellen, welche von Alters her bekannt sind.

462. Die Bitterquelle von Birnenstorf. Das Wasser wird erst seit 1842 benutzt. Analyse durch Bolley, feste Bestandteile 31,098 g/l (hauptsächlich schwefelsaure Magnesia 22 g/l). Die Wassertemperatur beträgt 20 °C bei 7,5 °C Lufttemperatur.

463. Das Glaubersalzwasser von Mülligen. Analyse durch Bolley 1824, feste Bestandteile 35,803 g/l (hauptsächlich schwefelsaures Natron 32,4 g/l).

464. Die jodhaltige Kochsalzquelle zu Wildegg. Es bestehen verschiedene Analysen,

Löwig fand darin feste Bestandteile von 13,678 g/l. Die Wassertemperatur beträgt 15,6 °C.

465. Die Gipsquelle des Laurenzbades und der Barmel, in der Nähe von Erlinsbach. Analyse durch Bolley, feste Bestandteile 0,445 g/l, die Wassertemperatur beträgt 16,9 bis 17,5 °C.

466. Die Solbadaanstalten zu Rheinfelden, Analyse der Sole durch Bolley, das spez. Gewicht betrug bei 14 °C 1,20569, der Liter Sole wog daher 1205,96 g und enthielt 320,116 g bei 110 °C getrockneten Rückstand. An Salzen waren in einem Liter Sole enthalten: Chlornatrium 311,632 g/l, Chloraluminium 0,638 g/l, Chlormagnesium 0,324 g/l, schwefelsaurer Kalk 5,965 g/l, kohlenaurer Kalk 0,183 g/l, Kieselsäure 0,087 g/l, Spuren von Phosphorsäure und Eisen, feste Bestandteile 318,83 g/l, freie Kohlensäure 0,203 g/l.

467. Die kochsalzhaltige warme Quelle von Säckingen. Die Wassertemperatur beträgt 31,3 °C, das Wasser hat einen bittersalzigen Geschmack. Analyse durch Fromherz, feste Bestandteile 9,912 g/l.

468. Quelle von Biberstein. Das Wasser inkrustiert Holz und Steine, die Wäsche wird vortrefflich gebleicht, aber schneller zerstört als durch anderes Wasser. Obwohl das Wasser reich an kohlensaurem Kalk ist, ziemlich viel schwefelsaure Verbindungen und auch etwas Tonerde enthält, ist es nach Zschokke kein eigentliches Mineralwasser.

469. Eine Schwefelquelle, die nach Thurneisen 1 Meile von Brugg in einem Wald entspringen soll.

470. Alkalische eisenhaltige Sauerquellen bei Döttingen. Es sind drei Quellen, aus denen 20 Mass in der Minute entspringen. Die Quellen laugen schwefelhaltigen Liaschiefer und Tonerde aus, entführen ihnen den Kalk, die Kieselsäure und das Eisen und nehmen tiefer dringend aus den dolomitischen Keupermergeln kohlenensaure Magnesia, Gips, Natronsalze und noch etwas Eisenoxyd auf. Analyse durch Schiebler 1861, feste Bestandteile 0,672 g/l.

471. Die erdige Quelle des Fisibachbades bei Fisibach. Das Wasser hatte den Geruch

nach Schwefelwasserstoff und soll einen schwachen grünen Niederschlag absetzen. Die Wassertemperatur der Quelle beträgt 12,5 °C bei 17,5 °C Lufttemperatur. Analyse durch Laffon 1830, feste Bestandteile 0,280 g/l.

472. Die erdige Quelle von Niederzeihen. Das Wasser hatte den Geruch nach Schwefelwasserstoff. Analyse durch Meyer 1829.

473. Die Quellen im Sulzthal. Die meisten der Salzquellen entspringen im Dorf Bütz in der Nähe von Gipslagern. Das Wasser wurde durch Zschokke untersucht. Die Quellen wurden 1806 von neuem ausgebeutet, wurden aber aufgrund der geringen Mengen wieder verlassen. In der Nähe sollen auch Schwefelquellen zu Tage treten. In Sulz befinden sich Gipsgruben und eine Mofette.

474. Die Quelle von Windisch. Eine Salzquelle, die ähnlich derjenigen von Birmensdorf (Nr. 462) sein soll.

Kanton Schaffhausen

475. Die Schwefelquelle des Bades von Unterhallau. Das Wasser ist kühl, opalisiert und enthält wenig Kalk, Eisen, kohlen- und schwefelsaure Salze.

476. Die Quellen von Osterfingen wurden schon von Gessner erwähnt. Analyse durch Laffon, feste Bestandteile 0,347 g/l. Das Wasser ist geruch- und geschmacklos und hat eine Temperatur von 10 bis 11,3 °C.

477. Das Bad Haslach bei Wilchingen. Die Quelle des Bades soll dieselben Bestandteile enthalten wie die in Osterfingen.

Literarnachweis zu den S. 177–210

– **Theophrastus Paracelsus**; Baderbüchlin aus mündlichen Übermittlungen, geschrieben von Adam Bodenstein; 1563.

– Über Theophrastus Bombastus von Hohenheim, genannt Paracelsus (1493–1541), vgl. **H. Fischer**; Gesnerus 2; 1945.

Ferner: **C.G. Jung**; Paracelsica; Zürich 1941.

– **B. Aschner**; Paracelsus' sämtliche Werke; Jena 1930.

– **Conrad Gessner**; Excerptorum et observatorum de Thermis in De Balneis; 1553.

– **B. Milt**; Conrad Gessner als Baineologe; in Vierteljahresschrift d. Schweiz. Ges. f. Geschichte der Medizin u. Naturw. 2; 1945.

– **Jakob Ziegler** (1591–1670);

Von dem köstlichen Bad Urdorff; Zürich 1662.

Beschreibung dess köstlichen warmen Gesundbads bey Schintznachts; Zürich 1663.

– **Johann Jakob Wagner** (1641–1695); J.J. Wagnerus, Historia naturalis Helvetiae curiosa; Tiguri 1680.

– **Johann Jakob Scheuchzer** (1672–1733); Von denen mineralischen Wassern des Schweitzerlands; Zürich 1716.

– **Johann Jakob Scheuchzer**; Hydrographia Helvetica.

– **Boulduc**; Zergliederung der Mineralwasser von Passy; zit. in L. v. Crell; Chemisches Archiv Bd. 3; 1785.

– **C.H. Senkenberg**; Untersuchung des Mineralwassers von Chiltenham in L. v. Crell, Chemisches Archiv 3; 1785.

– **C.F. Morell**; Chem. Untersuchung einiger bekannter und besuchter Gesundbrunnen und Bäder der Schweiz, insbesondere des Kantons Bern; Bern 1788.

– **Jakob Ziegler**; Bemerkungen über gemeines Wasser, natürliche u. künstliche Mineralwässer. Winterthur. 1799.

– **Jakob Ziegler**; Über die Bereitung künstlicher Mineralwässer; Zürich 1801.

– **Kiellmeyer**; Phys.-chem. Untersuchung des Schwefelwassers v. Stachelberg im Kanton Glarus; Stuttgart 1816.

– **C.F. Morell**; Helvetischer Almanach; 1820.



Theophrastus Paracelsus (1493–1541), geboren in Einsiedeln, verbrachte ein ruheloses Leben in unstillen Fahrten durch viele Länder. Stadtarzt und Professor in Basel. Veröffentlichte seine Arbeiten erstmals in deutscher (statt wie vorher in lateinischer) Sprache.

– **Mercanton**; Analyse des Eaux de Bex; 1824.

– **Fueter**; Zürcher Neujahrsgeschenke d. Ges. z. Schwarzen Garten; 1824.

– **Gabriel Ruesch**; Balneographie; Ebnat 1825/32.

– **Cappeler und Kaiser**; zit. von G. Ruesch: Das Bad Pfaffers in seiner neuen Gestalt; St. Gallen 1849.

– **G.W. Cappeler u. J.U. Kaiser**; Die Sauerquellen Graubündens; 1826.

– **Bauhof**; Zürcher Neujahrsgeschenke d. Ges. z. Schwarzen Garten; 1826.

– **Pagenstecher**; Korrespondenznachrichten.

– **C. Löwig**; Lehrbuch der Chemie; Heidelberg 1832.

– **J. Lavater**; Europas vorzüglichste Bäder und Heilquellen; Zürich 1836.

Geographische Tabellen der Mineralwasser und Bäder in den deutschen Staaten, Ungarn, Frankreich, der Schweiz, Italien, und Grossbritannien mit der Hydrakologie; Zürich 1836.

– **L.R. v. Fellenberg**; Analyse des Schwarzbrünneli zu Gurnigel.

– **Prof. R. Th. Simmler**; Untersuchung des Mineralwassers von Stachelberg; Journ. F. prakt. Chem. 71, 27; 1857.

– **Conrad Meyer-Ahrens**; Heilquellen und Kurorte der Schweiz; Zürich 1860.

– **Dr. B.M. Lersch**; Einleitung in die Mineralquellenlehre; Erlangen 1855; zweiter Band, Erlangen 1857.

Hydrochemie, Handbuch der Chemie der natürlichen Wässer; Berlin 1864.

– **Pechier**; Naturw. Anzeiger, IV. 37.

– **Brunner**; Zürcher Neujahrsgeschenke d. Ges. z. Schwarzen Garten.

– **Tschokke**; Helvetischer Almanach.

– **E. Osann**; Darstellung der Heilquellen der bekanntesten Länder Europas.

– **A. Vetter**; theoretisch-praktisches Handbuch der Heilquellenlehre.

– **Dr. Sc.nat. O. Gübelin-Litscher**; Chemische Untersuchung von Mineralwässern; Innsbruck 1948.

Verzeichnis der Mineral- und Heilquellen der Schweiz und ihrer Nachbargebiete

Nr.	Name der Quelle	Inhaltsstoffe								fester Bestand- teil mg/l	pH- Wert	el. Leitf. µS/cm	Temp. °C	Schüt- tung l/min	Mineralwassertyp
		Na mg/l	K mg/l	Mg mg/l	Ca mg/l	SO4 mg/l	HCO3 mg/l	Cl mg/l	CO2 mg/l						
1	Aix-les-Bains (F)	25–60		14	1209	184	386								Schwefel-Thermalwasser
2	Allonzier-La Caille (F)														Schwefelwasser
3–8	Etrembières, Lully														vermutlich schwefelhaltige Akratoquellen
9	Thonon-les-Bains (F)														Thermalquelle
10	Evian-les-Bains (F)														Thermalquellen
11	St-Gingolph	0,5	1	58	427	976	347	4	14	1822		11			Ca-SO ₄ -Wasser
12	Morgins	5		49	727	1781	206	7		2779		8			eisenhaltiges Ca-SO ₄ -Wasser
13	Champéry														gleicher Charakter wie 16 und 17
14	St-Gervais-les-Bains (F)	1286	42	32	324	2214	161	1055							Na-Ca-SO ₄ -Cl-Thermalwasser
15	Chamonix (F)	5		9	55	140	102								Schwefelwasser
16	Courmayeur (I)														Ca-SO ₄ -HCO ₃ -Säuerling
17	La Saxe (I)	107	9	121	834	1403	1508	107	1553			14			Ca-SO ₄ -HCO ₃ -Säuerling
18	Pré-St-Didier (I)											35			Akrato-Thermalwasser
19	St-Vincent (I)	2316	65	331	194	2599	3133	1176	1235			13			Na-SO ₄ -HCO ₃ -Cl-Säuerling
20	Bovernier														Akrato-Thermalwasser
21	Lavey-les-Bains	335	13	3	52	490	89	222	5	1320	7,8	1720	62		schwefelhaltiges Na-SO ₄ - HCO ₃ -Thermalwasser
22	Bex	919		53	99	115	324	1440		3002			11		schwefelhaltiges Na-Cl-Wasser
23	Aigle	1	10	7	77	51	221	2	42	370			8		schwefelhaltiges Na-Cl-Wasser
24	Montreux	20	9	12	123	30	450	17	56	678			11		Ca-Mg-HCO ₃ -Wasser
25	Saxon	24	3	37	118	215	302	14	41	734	6,7	740	25	1200	Ca-Mg-SO ₄ -HCO ₃ -Thermal- wasser
26	Saillon	9		44	290	600	170	5					23		Ca-Mg-SO ₄ -Thermalwasser
27	Aproz	8	2	89	597	1480	366	9	20	2571	7,5	2500	10	1600	Kalzium-Magnesium-Sulfat- wasser
28	Vex-Euseigne	409		98	600	1849	255	450					29		Ca-Na-SO ₄ -Cl-Thermalwasser
29	Romanel s. Lausanne	18	4	17	112	43	374	23		621	6,9	600	10		Ca-HCO ₃ -Akratowasser
30	Yverdon-les-Bains	15	3	50	288	585	363	27	30	1374	7,1	1200	10	50	Ca-Mg-SO ₄ -HCO ₃ -Thermal- wasser

Nr.	Name der Quelle	Inhaltsstoffe								fester Bestand- teil mg/l	pH- Wert	el. Leitf. µS/cm	Temp. °C	Schüt- tung l/min	Mineralwassertyp
		Na mg/l	K mg/l	Mg mg/l	Ca mg/l	SO ₄ mg/l	HCO ₃ mg/l	Cl mg/l	CO ₂ mg/l						
31	Yverdon-les-Bains	54	2	18	31	6	215	60		413			24		Na-Ca-Mg-Cl-HCO ₃ -Schwefel- therme
32	Les Ponts-de-Martel														Schwefelquelle
33	Henniez	6	4	16	127	16	412	20		642	6,9	730	9		Ca-Mg-HCO ₃ -Wasser
34	L'Alliaz	6		48	552	1292	298	2	29	2224			8		schwefelhaltiges Ca-SO ₄ - Wasser
35	Montbarry	20		36	384	805	384						11		schwefelhaltiges Ca-SO ₄ -HCO ₃ -Wasser
36	Riedquelle, Schwarzenburg	6	1	23	62	9	287	7	100	422	7,2	425	10	100	Ca-Mg-HCO ₃ -Wasser
37	Bonn														Schwefelquelle
38	Ottenleuebad														
39	Schwarzsee Bad	25	5	43	461	981	380	5	48						Ca-SO ₄ -HCO ₃ -Wasser
40	Schwefelbergbad	11	1	42	534	1090	405	6	253	2079	6,3	1880	5	20	schwefelhaltiges Ca-SO ₄ - Wasser
41	Gurnigelbad, Stockbrün.	12	4	5	547	1268	118	3	22	1977			10		Ca-SO ₄ -Wasser
42	Blumenstein	5	4	15	135	38	424	3	266	649			11		Ca-Mg-HCO ₃ -Säuerling
43	Weissenburg	15	4	74	334	1014	145	6	28	1627	7,1	1360	27	66	Ca-Mg-SO ₄ -Thermalwasser
44	Faulensee	10	1	49	571	1336	338	3					7		schwefelhaltiges Ca-SO ₄ - Wasser
	Schwefelquelle Krattigen	130	3,1	16	52	131	430	0,9	26		7,5	790			Na-HCO ₃ -Wasser
45	Rüthubel-Bad, Wikaswyler	4		16	84	4	332	6		455			12		Ca-Mg-HCO ₃ -Wasser
46	Bad Heustrich	267	29	1	3	167	506	6		1050			7	2	Na-SO ₄ -HCO ₃ -Schwefelwasser
47	Grimmialp/Rinderw.	19	4	32	556	1256	256	33		2162			5		Ca-SO ₄ -Wasser
48	Lenk i.S., Balmquelle	10	2	36	594	1350	317	4	6	2334	7,1	2280	7	50	schwefelhaltiges Ca-SO ₄ -HCO ₃ -Wasser
49	Adelboden	6	2	32	530	1139	323	11	47	2060	7,5	1950	7	900	schwefelhaltiges Ca-SO ₄ - Wasser
50	Leukerbad	21	2	59	426	1220	184	6	15	1874	7,0	1810	44	370	Ca-SO ₄ -Wasser
51	Brigerbad	160	20	3	116	474	95	86					34		Na-Ca-SO ₄ -Thermalwasser
52	L'Etivaz	32		75	624	1145	518	5		2713			19		schwefelhaltiges Ca-SO ₄ -HCO ₃ -Wasser
53	Crodo (I)	7		35	534	1382	66	2	1200				12		Ca-SO ₄ -Säuerling
54	Varzo Veglia (I)								1485				13		Ca-HCO ₃ -Säuerling

Nr.	Name der Quelle	Inhaltsstoffe								fester Bestand- teil mg/l	pH- Wert	el. Leitf. µS/cm	Temp. °C	Schüt- tung l/min	Mineralwassertyp
		Na mg/l	K mg/l	Mg mg/l	Ca mg/l	SO ₄ mg/l	HCO ₃ mg/l	Cl mg/l	CO ₂ mg/l						
55	Bognanco (I)	206	19	501	344	573	3525	51	1356				14		eisenhaltiger Mg-Ca-HCO ₃ -Säuerling
56	Craveggia (I)												31		Akrato-Thermalwasser
57	Orselina														einfacher Säuerling
58	Stabio Grottino	249	51	22	51	78	467	250					12	90	jod- und schwefelhaltiges Na-HCO ₃ -Cl-Wasser
59	Stabio Stampo	189	32	6	17	70	349	112					15	90	einfaches Schwefelwasser
60	Mazzoleni (I)														Kochsalzquelle
61	San Pellegrino Terme (I)	49	5	58	212	549	225	72					27		Ca-Mg-SO ₄ -HCO ₃ -Thermal- wasser
62	Trescore (I)	699		78	116	160	365	1229	76				17		Na-Cl-Wasser
63	Boario Terme (I)														Gipsquelle
64	Taceno (I)	12	10	99	521	1516	120	106	142				13		Ca-Mg-SO ₄ -Wasser
65	Terme Bagni Masino (I)	100				410							38		akratisches Thermalwasser
66	Le Prese	3	10	21	46	108	105	5	45	337			8	45	Ca-Mg-SO ₄ -HCO ₃ -Schwefel- wasser
67	Bormio (I)	549	156	3727	1416	13680	4733	143	2680				40	1200	radonhaltiger Mg-SO ₄ -HCO ₃ - Thermal-Säuerling
68	Valfura														Säuerling
69	Silvapiana	3	2	38	700	1199	810	1	431	2767			6		Ca-SO ₄ -HCO ₃ -Wasser
70	St. Moritz Bad	146	4	36	242	197	1092	14	1900	1673	5,9	1520	5	70	Ca-Na-HCO ₃ -Säuerling
71	Acla Orlandi														Gipsquelle
72	Magnacun														Gips-Säuerling
73	Val Sinestra	1156	84	124	713	422	3815	1002	2269				9	120	arsenhaltiger Na-Ca-HCO ₃ -Cl-Säuerling
74	Obladis (A)									1670			8		Kalk-Säuerling
75	Endbruck														Gips-Säuerling
76	Scuol-T. S. Luzius	3968	165	191	646	1813	7294	2474	2273	17376	6,7	15400	5	60	Na-HCO ₃ -Cl-Säuerling
77	Scuol-T. Lischana	814	35	400	194	940	3527	100	2626	5952	6,5	5100	7	20	Na-Mg-HCO ₃ -SO ₄ -Säuerling
78	Scuol-Tarasp Wih	10	2	20	488	14	1590	1	2135	2172	6,0	1800	9		Ca-HCO ₃ -Säuerling
79	Val Fuschna, Ftan ob.Q.	117	9	80	803	78	3099	4	483	4255					Ca-Mg-HCO ₃ -Eisensäuerling
80	Val Plavna	25	11	1	52	49	128	47	3185				6		Ca-Na-Cl-HCO ₃ -Eisensäuerling

Nr.	Name der Quelle	Inhaltsstoffe								fester Bestand- teil mg/l	pH- Wert	el. Leitf. µS/cm	Temp. °C	Schüt- tung l/min	Mineralwassertyp
		Na mg/l	K mg/l	Mg mg/l	Ca mg/l	SO ₄ mg/l	HCO ₃ mg/l	Cl mg/l	CO ₂ mg/l						
81	Serneus	60	6	31	88	56	422	1	122	812			8	60	Ca-Na-Mg-HCO ₃ -SO ₄ - Schwefelwasser
82	Fideris	302	19	29	292	38	1836	4	1610	2549			8	4	Ca-Na-HCO ₃ -Säuerling
83	Castiel	716	54	71	227	118	2694	135	2270				5		Na-Ca-HCO ₃ -Säuerling
84	Sassal	11	3	42	258	59	932	16	460	1341	6,4	1390	8		Ca-Mg-HCO ₃ -Säuerling
85	Praden	177	25	25	142	35	998	22	1950						Na-Ca-HCO ₃ -Säuerling
86	Passugg, Ulricus	2040	46	105	206	190	5560	500	2270	8728	6,5	7230	8	0,2	jodhaltiger Na-HCO ₃ -Säuerling
87	Bad Ragaz-Pfäfers	27	3	16	55	27	236	32	16	412	7,4	380	39	100	Ca-Mg-Na-HCO ₃ -Cl-SO ₄ - Thermalwasser
88	Spinabad - Clavadel	1		3	24	16	70	1	23	130			7		Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄ -Akratopege (Schwefelwasser)
89	Bergün, Ova cotschna	5	4	66	314	1343	188	5	30	1466			17	50	Ca-Mg-SO ₄ -HCO ₃ -Wasser
90	Alvaneu Bad, untere Q.	3	1	66	233	687	188	1	31	1196			9		schwefelhaltiges Ca-Mg-SO ₄ -Wasser
91	Tiefencastel	974	52	43	525	1903	1464	356	1202				10		eisenhaltiger Na-Ca-SO ₄ -HCO ₃ -Säuerling
92	Tinizong (Tinzen)	23	4	15	58	308					4,6 5,6			3	schwefelsaures, eisen- und kupferhaltiges Ca-SO ₄ -Wasser; 158 mg/l H ₂ SO ₄
93	Solis, Donatusquelle	1238	32	73	311	1422	1580	734	765	5426					schwefelhaltiges Ca-Mg-SO ₄ -HCO ₃ -Wasser
94	Rhäzüns	160	9	41	227	163	1140	23	1080	1836	6,4	1530	18	200	Ca-Na-HCO ₃ -SO ₄ -Säuerling
95	Rothenbrunnen	67	7	42	170	84	808	9	360	1191	6,3	1130	18	160	Ca-Mg-HCO ₃ -Wasser
96	Tomils/Tumegl	28	7	129	375	219	1615	1	1195	2402			7	25	Ca-Mg-HCO ₃ -Säuerling
97	Peiden	102	12	40	411	730	710	43		2080	6,4	2100	15	100	Ca-Na-HCO ₃ -SO ₄ -Säuerling
98	Andeer	10	2	58	554	1453	168	4	13	2246	7,0	2030	20	200	Kalzium-Sulfat-Wasser
99	Innerferrera														Kalzium-Sulfat-Thermalwasser
100	Vals, St. Peter	8	2	50	388	880	345	4	74	1710	6,7	1680	26	600	Ca-SO ₄ -HCO ₃ -Thermalwasser
101	San Bernardino	16	7	75	715	1198	1119	5	1600	3200			8		eisenhaltiger Ca-SO ₄ -HCO ₃ -Säuerling
102	Acquarossa	21	16	80	606	1371	634	220	370	2638	6,5	2400	26	160	Ca-SO ₄ -HCO ₃ -Thermalwasser
103	Disentis	7	2	5	44	132	23	4	31	268	6,2	320	7	55	Radonwasser
104	Tenigerbad	4	2	71	587	1629	162	2	30	2432	7,3	2230	13		Kalzium-Sulfat-Wasser

Nr.	Name der Quelle	Inhaltsstoffe								fester Bestand- teil mg/l	pH- Wert	el. Leitf. µS/cm	Temp. °C	Schüt- tung l/min	Mineralwassertyp
		Na mg/l	K mg/l	Mg mg/l	Ca mg/l	SO ₄ mg/l	HCO ₃ mg/l	Cl mg/l	CO ₂ mg/l						
105	Gletsch														akratische Quelle
106	Handegg														akratische Quelle
107	Sörenberg	161	2	11	46	101	472	14		828					Schwefelquelle mit akkratischer Mineralkonzentration
108	Flühli - Schimberg	245	2	3	4	6	655	2		934			11		Schwefelwasser, Na-HCO ₃ -Wasser
109	Schwendi Kaltbad	18	2	4	81		317	4		446			4		Ca-HCO ₃ -Wasser
110	Cornol														Kalzium-Sulfat-Wasser
111	Bellerive														Kalzium-Sulfat-Wasser
112	Meltingen	5	2	91	581	1443	403	3	66	2556	6,9	2200	10	150	Ca-Mg-SO ₄ -Wasser
113	Attisholz	7	2	7	86	19	281	9	13	424			15		Ca-Mg-HCO ₃ -Wasser
114	Gutenburg			19	83		348	6		461			12		akratische, eisenhaltige Quelle
115	Pfaffnau														Natrium-Chlorid-Wasser
116	Zofingen	5	3	8	70	3	263	3		377			10		Ca-Mg-HCO ₃ -Wasser
117	Knutwil	4,7	1,4	23	87	22	361	4,1		523	7,7	535	11	7-10	Ca-Mg-HCO ₃ -Wasser
118	Moosleerau	4	7	17	86	7	353	3		495			9		Ca-Mg-HCO ₃ -Wasser
119	Seewen SZ	28		1	96		354	13		513			8		Na-Ca-HCO ₃ -Wasser
120	Oberiberg	87	7	11	44	119	52	18		454			6		Na-Ca-Mg-HS-SO ₄ -HCO ₃ - Schwefelwasser
121	Stachelberg									580			10		Schwefelquelle
122	Elm	3	1	4	122	102	268	0,02	63	511	7,1	530	7		Ca-SO ₄ -HCO ₃ -Wasser
123	Rietbad	27	1	22	44	17	285	7	22	415	7,3	407	7	10	Na-Mg-Ca-HCO ₃ -Wasser
124	Hohenems (A)														Schwefelquelle
125	Andelsbuch (A)														Eisen-Säuerling
126	Tiefenbach (A)														schwefelhaltige Natronquelle
127	Bad Sulzbrunn (A)														jodhaltige Kochsalzquellen
128	Jakobsbad	12	5	6	86		330	0,4		440					Ca-HCO ₃ -Wasser
129	Gontenbad	3	1	18	95	14	380	3	43	532	7	450	8	1	Ca-HCO ₃ -Wasser
130	Unterrechstein	132	1	1	3	8	280	4	0	480	8,7	490	9	< 4	Na-HCO ₃ -Wasser
131	Walzenhausen	25	1	10	44	15	228	3	13	345	7,1	346	9	12	Na-HCO ₃ -Wasser
132	Herisau, Heinrichsbad									370					Ca-HCO ₃ -Wasser
133	Gyrenbad ZH	2	1	26	100	8	425	1		574			8		Ca-Mg-HCO ₃ -Wasser

Nr.	Name der Quelle	Inhaltsstoffe								fester Bestand- teil mg/l	pH- Wert	el. Leitf. µS/cm	Temp. °C	Schüt- tung l/min	Mineralwassertyp
		Na mg/l	K mg/l	Mg mg/l	Ca mg/l	SO ₄ mg/l	HCO ₃ mg/l	Cl mg/l	CO ₂ mg/l						
134	Schweizerhalle	117761	27	108	1315	3121	213	181664							Förderbohrung 125–146 m Tiefe
135	Sissach	10	4	69	617	1494	316		2545	6,9	2300	12	80	Kalzium-Sulfat-Wasser	
136	Oberdorf													Ca-Mg-SO ₄ -HCO ₃ -Wasser	
137	Ramsach	3	1	13	354	730	195	6	1314	7,5	1350	8	100	Ca-Mg-SO ₄ -HCO ₃ -Wasser	
138	Eptingen	5	2	44	348	864	180	5	1460	7,85	1300	8	120	Kalzium-Sulfat-Mineralwasser	
139	Wintersingen	9	4	78	584	1456	285	6	2439	7,1	2000	12	90	Ca-SO ₄ -Wasser	
140	Lostorf	25	5	130	501	1507	262	48	2509	6,9	2520	27	3000	schwefelhaltiges Na-Cl-HCO ₃ -Wasser	
141	Schwarzenberg	6	3	6	94	6	347	2	470					Ca-Mg-HCO ₃ -Wasser	
142	Densbüren													Kalzium-Sulfat-Wasser	
143	Wildeggen	3867	3	418	687	1248	72	7411	13740			11	60	jodh. Na-Ca-Mg-Cl-SO ₄ -Wasser	
144	Schinznach Dorf	6	3	80	544	1360	380	11	2367	6,9	1870	12	30	Ca-SO ₄ -HCO ₃ -Wasser	
145	Schenkenberg	5	2	65	485	1117	434	6	2123					kaltes Gipswasser	
146	Schinznach Bad	289	15	64	281	770	366	380	36	2199	7,1	2400	31	180	schwefelh. Na-Ca-SO ₄ -Cl- Thermalwasser
147	Birmenstorf	4037	196	4116	415	25059	306	602	33744			10	2	Mg-Na-SO ₄ -Wasser	
148	Baden-Schwanenquelle	712	59	101	524	1365	457	1118	330	4525	6,55	5200	46	700	Na-Ca-Cl-SO ₄ -Thermalwasser
149	Zurzach	299	7	1	16	263	265	135	< 5	1007	8,0	1260	39	1800	Na-SO ₄ -HCO ₃ -Cl-Thermal- wasser, artesisch gesp. Wasser aus 420 m Tiefe
150	Eglisau	892	4	7	43	303	294	1085	9	2643	8,4	3380	16	250	jodhaltiges Na-Cl-Wasser, Bohrung
151–154	Gouhenans-Saulnot (F)														gel. Steinsalze des Keupers, artesisch gespannt
155	Luxeuil-les-Bains (F)	380	22	2	29	112	118	490				62	250	Natrium-Chlorid-Thermal- wasser	
156	Wattwiller (F)	76		65	142	179	594	89				15		Ca-Mg-Na-HCO ₃ -SO ₄ -Wasser	
157	Velleinfroy (F)													Sulfatwasser	
158	Neuwiler (F)	204	9	8	21	76	427	87				38	216	Akrato-Thermalwasser	
159	Grenzach (D)	1801	9	77	527	3009	626	1362	213			12	181	Na-SO ₄ -Cl-Wasser aus 32 m Tiefe	
160	Rheinfelden, Kapuziner	20	4	30	159	182	369	40	205	846	7,1	800	10	Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄ -Wasser	

Nr.	Name der Quelle	Inhaltsstoffe								fester Bestand- teil mg/l	pH- Wert	el. Leitf. µS/cm	Temp. °C	Schüt- tung l/min	Mineralwassertyp
		Na mg/l	K mg/l	Mg mg/l	Ca mg/l	SO ₄ mg/l	HCO ₃ mg/l	Cl mg/l	CO ₂ mg/l						
161	Magden	9	4	115	559	1528	370	3		2621	7,0	2000	12	180	Ca-Mg-SO ₄ -Wasser
162	Bad Säcking. Badw.-Q. (D)	987	80	13	99	174	357	1509					30	102	Natrium-Chlorid-Thermal- wasser in 4 m Tiefe
163	Niedermumpf														Natrium-Chlorid-Wasser
164	Sulz													48	Natrium-Chlorid-Wasser
165	Sierentz (F)														thermale Sole in einer Tiefe von 591 m
166	Haagen (D)														natürliches Na-Cl-Wasser
167	Brombach (D)														natürliches Na-Cl-Wasser
168	Bad Bellingen (D)	940	35	112	372	196	171	1880	572				37	900	Thermalwasser aus 635 m Tiefe
169	Steinstadt (D)	586	32	91	309	200	781	1152	660				32	120	Na-Cl-HCO ₃ -Thermalwasser
170	Kandern-Riedlingen (D)	8	1	11	86	17	305	7	33				18		Akratopege
171	Liel (D)	14		7	148	31	408	50	86				18		Akratopege
172	Müllheim (D)	17	8	16	158	44	517	26					20	600	Akratopege
173	Badenweiler (D)	32	3	7	48	66	175	8	11				26		Akrato-Thermalwasser
174	Bad Krozingen (D)	1430	194	218	651	2442	2074	992	1340				27		Na-Ca-SO ₄ -HCO ₃ -Cl-Säuerling, Bohrung mit einer Tiefe von 500 m
175	Bürchau (D)	12		4	13	12	67	5					21	30	Akrato-Thermalwasser
176	Todtmoos (D)														Akrato-Thermalwasser
177	St. Blasien (D)														Akrato-Thermalwasser
178	Höchenschwand (D)														Bäder mit Akratopegen
179	Menzenschwand (D)														radioaktives Wasser aus Uranerzen
180	Tiengen (D)	13		43	535	1208	328	13					9		Kalzium-Sulfat-Wasser
181	Küssaburg-Rheinheim (D)														Industrieller Abbau von Salzlagern
181	Bonndorf-Boll (D)	169	8	29	67	115	615	21					12	78	schwefelhaltiges Na-Ca-HCO ₃ -Wasser
183	Singen (D)	439	9	7	17	509	372	112	8				26	12	Na-SO ₄ -HCO ₃ -Thermalwasser, Bohrung

Nr.	Name der Quelle	Inhaltsstoffe								fester Bestand- teil mg/l	pH- Wert	el. Leitf. µS/cm	Temp. °C	Schüt- tung l/min	Mineralwassertyp
		Na mg/l	K mg/l	Mg mg/l	Ca mg/l	SO ₄ mg/l	HCO ₃ mg/l	Cl mg/l	CO ₂ mg/l						
184	Lottsetten (D)	275	13	7	14	110	488	94				22		Na-HCO ₃ -Thermalwasser, Bohrung 543 m	
185	Owingen (D)	14230	5493	112	2307	1440	2318	29260	1980			75		eisenh. Thermal-Sole-Säuerling, Erdölbohrung	

Bergwasseranalyse aus bestehenden Bauwerken

Nr.	Name der Quelle	Inhaltsstoffe								fester Bestand- teil mg/l	pH- Wert	el. Leitf. µS/cm	Temp. °C	Schüt- tung l/min	Mineralwassertyp
		Na mg/l	K mg/l	Mg mg/l	Ca mg/l	SO ₄ mg/l	HCO ₃ mg/l	Cl mg/l	CO ₂ mg/l						
200	Tunnel RC 2125	7,2	6,2	8	87,7	9,96		11,5			7,5	476			Ca-Wasser
201	Tunnel de Sauge	2,5		2,9	142	9,2		12				710			
202	Umfahrung Leissingen	7,2	1,3	11	75	32	264	1,2	14		7,6	410			Ca-HCO ₃ -SO ₄ -Wasser
203	Lötschbergtunnel	300	1,25	0,28	429	1330	9	246	3		8,76	2670			Ca-Na-SO ₄ -HCO ₃ -Wasser
204	Rawiltunnel	169		2,7	1	3	425	< 0,1			9,2	660			Na-HCO ₃ -Wasser
205	Simplontunnel				550	2500	1330	480			8,3	6010			Ca-SO ₄ -HCO ₃ -Cl-Wasser
206	St. Moritz Tiefbohrung	3000	20	406	570	1800	8400	790	2300		6,67	12000			SO ₄ -HCO ₃ -Wasser
207	Zugwaldtunnel RhB	1430	35,8	218	509	4600	256	2	427		6,73	7840			Na-SO ₄ -Wasser
208	Vereinattunnel RhB	155				620	100	2,9	27		7,7				Na-SO ₄ -Wasser
209	Isla-Bella-Tunnel A13				116		433				7,8	720			
210	Crapteigtunnel A13				115		293				8,0	510			
211	Kraftwerk Bärenburg				272	680	268	< 1			7,5				
212	Valtschiel-Fundognstollen														
213	Umfahrung Trin				58,6	28	269				7,7	349			
214	Aclatobeltunnel				121		232				7,9	520			
215	Stauanlage Panix				44		201				9,6	272			
216	Zervreila-Wanna-Peil			32		1190		5	s. viel			1792			SO ₄ -Wasser
217	San-Bernardino-Tunnel	1560	108	219	381	4590		399	s. viel		8,0	7440			Na-SO ₄ -Cl-Wasser
218	Stollen Valbella Spin (Piz Grand)	985	110	1,4	288	981		21	48		12,7	9040			Na-Ca-SO ₄ -Wasser
219	Gotthardstrassentunnel	1500	38	64	420	4500	82	75	s. viel						Na-Ca-SO ₄ -Wasser
220	Sondierstollen Pioramulde	196	4,4	56,4	526	2224	75	4,1	lokal		7,8	2400			Ca-SO ₄ -Wasser
221	Furka-Basistunnel FOB				31,4		36,6				9,2	242			
222	Umfahrung Sachseln	2900	52	n.n.	95,4	7,3	n.n.	4403	80,4		12,1	13500			Na-Cl-Wasser
223	Rotzloch	46	11	5,43	0,72	36	124								Na-HCO ₃ -Wasser
224	Stollen KW Dallenwil	200	2	1,8	0,12	4	421	2,9	46		9,2	730			Na-HCO ₃ -Wasser
225	Luzerner Stadttunnel			17		35	269	24			7,8	580			SO ₄ -HCO ₃ -Wasser
226	Vielnacherntunnel	1,9	0,45			24		7			8,3	480			SO ₄ -Wasser
227	Oberbauenstock	2987	11,38	28,5	195	3015	1157	2210				13795			Na-SO ₄ -HCO ₃ -Cl-Wasser
228	Oberbauenstock	2810	18,48	16,9	95	2593	201	2694				12312			Na-SO ₄ -HCO ₃ -Wasser
229	Seelisbergtunnel HGB	1200	15	14	47	300	118	1700			7,15	5120			Na-SO ₄ -Wasser

Nr.	Name der Quelle	Inhaltsstoffe								fester Bestand- teil mg/l	pH- Wert	el. Leitf. µS/cm	Temp. °C	Schüt- tung l/min	Mineralwassertyp
		Na mg/l	K mg/l	Mg mg/l	Ca mg/l	SO ₄ mg/l	HCO ₃ mg/l	Cl mg/l	CO ₂ mg/l						
230	Seelisbergtunnel	970				225	90	1660			9,1	6100			Na-SO ₄ -Wasser
231	Kraftwerk Linth-Limmern					512					9,7				
232	Quartentunnel A3	6,3	24,2	5,3	70,1	28,2		5,9			7,54	436			Ca-SO ₄ -Wasser
233	Werkleitungstollen (FL)				64		195	14,2			9,0	324			
234	Rickentunnel					< 20	281	1	20		8,9	430			
235	Rosenbergtunnel	> 1300	viel			165	8,6	685			10,5	9020			Na-Cl-Wasser
236	Riesbachtunnel	stark				81	269	550			8,1	2240			Cl-HCO ₃ -Wasser
237	Dettenbergtunnel	20	4	30	74	40		<0,1			7,8	540			
238	Koblenz	10,7	7,7	17,2	68	83	166	16,9							Ca-SO ₄ -HCO ₃ -Wasser
239	Bözbergtunnel SBB	2623		97	594	1378	67	1895			7,5				Na-SO ₄ -Cl-Wasser
240	Bözbergtunnel A3	1943	34	91	251	4122	159	1426			7,43	8350			Na-Cl-SO ₄ -Wasser
241	Hauenstein Basistunnel				117	350	324	13			8,1	960			Ca-SO ₄ -Wasser
242	Belchentunnel A2	1230	39	65	207	2394	372	385			8,9	5800			Na-SO ₄ -Wasser
243	Belchentunnel A2 Sickerschlitze				326	820	470	56			7,5	2050			Ca-SO ₄ -Wasser
244	Oberer Hauensteintunnel					520	567	6			7,0				Ca-HCO ₃ -Wasser
245	Arisdorftunnel				154	33	268	39			8,3	575			Ca-Wasser
246	Frenkendorf Adler Sondierbohrung	11		4,1	150	56	351	27							
247	Adlertunnel SBB				194			49,7			8,5	1570			
248	Eggfluetunnel J18				63	65	256				7,5	358			

Begriffe

aerobes Wachstum

Wachstum von Mikroorganismen, wenn die zur Synthese von Biomasse benötigte Energie durch Übertragung von Elektronen auf gelösten Sauerstoff gewonnen wird (Sauerstoff als Elektronenakzeptor).

anaerobes Wachstum

Wachstum von Mikroorganismen unter Ausschluss von gelöstem Sauerstoff Nitrit und Nitrat. Als Elektronenakzeptoren werden Substanzen verwendet, z.B. Sulfat, Eisen(II), organische Verbindungen.

AOX

Adsorbable Organic Halogenic Substances = Konzentration an organischen Halogenverbindungen, insbesondere Konzentration der chlororganischen Verbindungen; Dimension: mg/l.

Bakterien

Einzellige Mikroorganismen aus der Gruppe der Prokaryonten.

BSB5

Biologischer Sauerstoffbedarf, ermittelt aus der Menge an Sauerstoff, die von Mikroorganismen im Verlauf von 5 Tagen verbraucht wird. Äquivalent für die Konzentration an biologisch abbaubaren organischen Substanzen; Dimension: mg/l.

CSB

Chemischer Sauerstoffbedarf, ermittelt aus der Menge an Sauerstoff, die zur chemischen Oxidation organischer Substanzen verbraucht wird; Oxidationsmittel ist Kaliumdichromat. Äquivalent für die Konzentration an organischer Substanz insgesamt; Dimension: mg/l.

Dissoziierte/ undissoziierte Moleküle

Moleküle sind dissoziiert, wenn sie in elektroneutrale Moleküle, Atome, Radikale oder Ionen gespalten sind. Die Dissoziation kann thermisch, photochemisch oder elektrolytisch erfolgen.

Beispiel: Natriumchlorid undissoziiert: NaCl, dissoziiert: Na⁺ und Cl⁻.

Froude-Zahl

Bei allen Bewegungen einer Flüssigkeitsoberfläche (z.B. Luftblase in Wasser oder Wasserfilm an Rührerblatt) spielt das Verhältnis der auf die Oberfläche wirkenden Trägheitskräfte zur Schwerkraft eine entscheidende Rolle. Es wird durch die Froude-Zahl Fr charakterisiert:

$$Fr = \frac{v^2}{g \cdot l}$$

v = Strömungsgeschwindigkeit [m s⁻¹]

g = Erdbeschleunigung [9,81 m s⁻²]

l = charakteristische Länge (z.B. Durchmesser einer Luftblase) [m].

Die Froude-Zahl stellt das Verhältnis der Trägheitskräfte, die auf eine Oberfläche wirken, zur Schwerkraft dar.

Isomere

Bezeichnung für Moleküle (Atome, Teilchen), die aus der gleichen Anzahl gleicher Atome bestehen, sich jedoch hinsichtlich ihrer Anordnung unterscheiden können. Beispiel: i-Buttersäure (CH₃)₂CHCOOH und n-Buttersäure CH₃CH₂CH₂COOH.

Konglomerate

artverwandte Stoffe

Liganden

Bezeichnung für Ionen und elektr. neutrale Moleküle, die um ein Zentralatom gruppiert sind und deren Anzahl in den Komplexen von der Koordinationszahl des Zentralatoms bzw. -ions abhängt.

Beispiel. Bei 1-Butanol C₂H₅-CH₂-CH₂OH besitzt das C-Atom 2 vier Liganden: 2 · H, C₂H₅ und CH₂OH.

Metazoen

Mehrzellige Organismen

Monomer/ Polymer

Monomere sind Bausteine von Makromolekülen (Polymere). Die mehrfache Wiederholung des Bausteins, auch in Kombination mit anderen Monomeren, ergibt das Polymer.

Beispiele:

Vinylchlorid $\text{H}_2\text{C}=\text{CHCl}$ → Polyvinylchlorid (PVC), Glucose → Cellulose, Aminosäuren → Peptide.

Organisch/ anorganisch

Organische Substanzen sind Kohlenstoffverbindungen, die nach ursprünglicher Auffassung dem Bereich der belebten Natur, anorganische dem Bereich der unbelebten Natur entstammen. Zu der Gruppe der organischen Substanzen gehören allerdings auch Xenobiotika.

Pathogen

Mikroorganismen, die Krankheiten erregen können (Bakterien, Protozoen, Viren).

polar/ unpolar

Polar sind solche funktionellen Gruppen, deren charakteristische Elektronenverteilung dem Molekül ein beträchtliches Dipolmoment erteilt.

Beispiel für ein polares Lösungsmittel: Wasser.

Eine Verbindung ist unpolar (apolar), wenn sie sich weder elektrolytisch zerlegen lässt noch ein permanentes elektrisches Dipolmoment besitzt.

Beispiel für unpolare Lösungsmittel: Hexan, Benzol.

Primäres Entwässerungssystem:

Das primäre Entwässerungssystem beinhaltet die Elemente Gesteinsklüfte, sämtliche flächenhaften Drainagemassnahmen wie z.B. Noppenbahnen bzw. -streifen, Drainagematten sowie Sickerpackungen um die Drainageleitungen und die Öffnungen der Drainagerohre. Das primäre Entwässerungssystem ist während des Betriebs der Infrastrukturanlage nicht zugänglich und kann nicht unterhalten werden.

Reynolds-Zahl

An einem Strömungsteilchen greifen im Allgemeinen Druckkräfte F_p und Reibungskräfte F_r an, deren geometrische Summe gleich der Trägheitskraft ist. Sollen zwei Strömungen ähnlich verlaufen, so müssen die

geometrischen Konturen der um- und durchströmten Körper ähnlich sein und die gebildeten Reynolds-Zahlen übereinstimmen. Die Reynolds-Zahl wird berechnet nach:

$$\text{Re} = \frac{w \cdot l}{\nu}$$

l = charakteristische Länge [m]

w = Geschwindigkeit [m s^{-1}]

ν = kinematische Viskosität des Fluids [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]

für Wasser gilt $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (bei 20°C)

Die Reynolds-Kennzahl gibt das Verhältnis der an den Strömungsteilchen angreifenden Trägheitskräfte zu den Zähigkeitskräften (Reibungskräften) an.

Sekundäres Entwässerungssystem:

Das sekundäre Entwässerungssystem dient der Bergwasserableitung und beinhaltet die Elemente der Drainagerohre (innen, zugänglich), Kontrollschächte, Schlamm-sammler, Zuleitungen und Entwässerungsleitungen. Das sekundäre Entwässerungssystem bezeichnet die Elemente, die unterhalten werden können.

Substituent

In der org. Chemie verwendete Bezeichnung für ein Atom oder eine Atomgruppe (Rest), die in einen Grundkörper durch Substitution an die Stelle eines Wasserstoffatoms getreten ist.

Beispiel: Bei Chlorbenzol $\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$ ist Chlor der Substituent eines Wasserstoffatoms des Benzols C_6H_6 .

TOC

Total Organic Carbon = gesamter organisch gebundener Kohlenstoff. Konzentration an organisch gebundenem Kohlenstoff als Mass für die Konzentration an organischer Substanz im Abwasser; Dimension: mg/l .

TKN

Total Kjeldahl Nitrogen = Konzentration an Gesamt-Stickstoff als Summe organisch gebundenem Stickstoff und Ammonium-Stickstoff; $\text{TKN} = \text{org.N} + \text{NH}_4\text{-N}$; Dimension: mg/l .

TR

Trockenrückstand; Summe der Konzentration aus gelösten und abfiltrierbaren Stoffen. Dimension: mg/l.

TS

Trockensubstanz; Konzentration der im Abwasser enthaltenen ungelösten, abfiltrierbaren Stoffe; Dimension: mg/l.

Versinterungsstärke:

Die Versinterungsstärke bezeichnet die Menge an Karbonatablagerungen, die durch das anfallende Bergwasser in einem Drainage- und Entwässerungssystem ausgeschieden wird.

Versinterungsrate:

Die Versinterungsrate bezeichnet die Menge an Karbonatablagerungen, die von 1 Liter Bergwasser in einem Drainage- und Entwässerungssystem in einer definierten Zeiteinheit ausgeschieden wird. Die Versinterungsrate im primären Entwässerungssystem bezeichnet so die Menge an Karbonatablagerungen, die von 1 Liter Bergwasser beim Zuströmen auf das Bauwerk bis zum Eintritt in das sekundäre Entwässerungssystem verursacht wird. Idealerweise wird die Versinterungsrate in deutschen Härtegraden °dH angegeben. Zur Berechnung der Ablagerungen gilt

1 °dH = 10 mg CaCO₃ entspricht 17,8 mg CaCO₃ (ohne Kristallwasser, d.h. in getrockneter Form).

Versinterungsgrad:

Der Versinterungsgrad beurteilt den Zustand eines Drainage- und Entwässerungssystems bezüglich der darin enthaltenen Karbonatablagerungen.

Versinterungshohlraum:

Der Versinterungshohlraum bezeichnet das Volumen (Liter pro Laufmeter Bauwerk), das dem Bergwasser auf seinem Fließweg vom Gebirge bis zum sekundären Entwässerungssystem zur Bildung von Ablagerungen zur Verfügung steht. Der Versickerungshohlraum muss so gross bemessen werden, dass das drucklose Ableiten des Bergwassers während der gesamten Lebensdauer möglich ist (kein Wasserdruckaufbau). Das sekundäre Entwässerungssystem gehört nicht zum Versinterungshohlraum.

Xenobiotika

Kohlenstoffverbindungen, die vom Menschen gemacht sind und in der freien Natur nicht vorkommen (Fremdstoffe)

Gesucht		Gegeben		Rechenoperation	
Mg ²⁺	(mg/l)	MgO	mg/l	Mg ²⁺	= MgO · 0,603
MgO	(mg/l)	Mg ²⁺	mg/l	MgO	= Mg ²⁺ · 1,658
Mg—H	(dH°)	Mg ²⁺	mg/l	Mg—H	= Mg ²⁺ · 0,230
Mg—H	(dH°)	MgO	mg/l	Mg—H	= MgO · 0,139
Ca ²⁺	(mg/l)	CaO	mg/l	Ca ²⁺	= CaO · 0,715
CaO	(mg/l)	Ca ²⁺	mg/l	CaO	= Ca ²⁺ · 1,399
Ca ²⁺	(mg/l)	CaO	mg/l	Ca ²⁺	= CaO · 0,036
Ca—H	(dH°)	Ca ²⁺	(mg/l)	Ca—H	= Ca ²⁺ · 0,14
Ca—H	(dH°)	CaO	mg/l	Ca—H	= CaO · 0,1
MgO/CaO		MgO, CaO	mg/l	MgO/CaO	= MgO/Ca · 1,19
NO ₃ ⁻	mg/l	N ₂ O ₅	mg/l	NO ₃ ⁻	= N ₂ O ₅ · 0,605
NO ₂ ⁻	mg/l	N ₂ O ₃	mg/l	NO ₂ ⁻	= N ₂ O ₃ · 0,605
PO ₄ ³⁻	mg/l	P ₂ O ₅	mg/l	PO ₄ ³⁻	= P ₂ O ₅ · 0,669
SO ₄ ²⁻	mg/l	SO ₃	mg/l	SO ₄ ²⁻	= SO ₃ · 1,2
HCO ₃ ⁻	mg/l	m-Wert		HCO ₃ ⁻	= m-Wert · 61
HCO ₃ ⁻	mg/l	KH	(dH°)	HCO ₃ ⁻	= KH · 21,8
HCO ₃ ⁻	mg/l	CO _{2geb.}	mg/l	HCO ₃ ⁻	= CO _{2geb.} · 2,77
KH	(dH°)	m-Wert		KH	= m-Wert · 2,8
KH	(dH°)	HCO ₃ ⁻	mg/l	KH	= HCO ₃ ⁻ · 0,046
KH	(dH°)	CO _{2geb.}	mg/l	KH	= CO _{2geb.} · 0,127
GH	(dH°)	Ca ²⁺ , Mg ²⁺	mval/l	GH	= (Ca ²⁺ +Mg ²⁺) · 2,8
NKH	(dH°)	KH, GH		NKH	= GH - KH
NaHCO ₃	mg/l	KH, GH		NaHCO ₃	= (KN - GH) · 30

Tab. 1: Umrechnung von Wasserinhaltsstoffen aus einer gegebenen in die gesuchte Form (ALBRECHT u.a. 1978).

Titrationsergebnis	Hydroxid OH ⁻	Karbonat CO ₃ ²⁻	Hydrogenkarbonat HCO ₃ ⁻
p = 0	0	0	m
p < ½ m	0	2p	m - 2p
p = ½ m	0	2p	0
p > ½ m	2p-m	2 (m - p)	0
p = m	m	0	0

Tab. 2: Anteilige Berechnung von Hydroxid, Karbonat und Hydrogenkarbonat mittels p- und m-Wert.

Die ermittelten und in den einzelnen Spalten einzusetzenden p- und m-Werte sind mit den entsprechenden Äquivalentmassen für OH⁻, CO₃²⁻ und HCO₃⁻ zu multiplizieren.

Beispiel:

p-Wert = 0,5; m-Wert = 2,5

Der Karbonatgehalt errechnet sich, da p < ½ m ist, zu

$$2p = 1,0 \text{ meq/l CO}_3^{2-}$$

$$1,0 \cdot 30 = 30 \text{ mg/l CO}_3^{2-}$$

und der Hydrogenkarbonatgehalt zu

$$m - 2p = 2,5 - 1,0 = 1,5 \text{ meq/l HCO}_3^{-}$$

$$1,5 \cdot 61 = 91,5 \text{ mg/l HCO}_3^{-}$$

Härtegrad	Kalkkonzentration
1 deutscher Härtegrad, °dH	10 mg CaO/l H ₂ O
1 französischer Härtegrad, °fH	10 mg CaCO ₃ /l H ₂ O
1 englischer Härtegrad, °eH	10 mg CaCO ₃ /0,7 l H ₂ O
1 amerikanischer Härtegrad, °aH	1 mg CaCO ₃ /l H ₂ O
1 englischer Härtegrad	0,8 °dH
1 deutscher Härtegrad	1,2 °eH
1 deutscher Härtegrad	1,7 °fH
1 französischer Härtegrad	0,56 °dH
1 französischer Härtegrad	1,2 °eH
1 amerikanischer Härtegrad	0,056 °dH

Tab. 3: Umrechnung international unterschiedlicher Härtegrade (Höllting 1968).

Indikatoren	Anthropogene Einflüsse	Marine Einflüsse	Geogene Einflüsse	Sonstige Einflüsse
1. chemische Inhaltsstoffe a) Auftreten b) Konzentration	Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , Cl ⁻ , NH ₄ ⁺ , SO ₄ ²⁻ , KMnO ₄ ⁻ Verbrauch, PO ₄ ³⁻ , Härte, K ⁺ , Phenole, Schwermetalle	Cl ⁻	GH, KH, Fe ²⁺ , Mn ²⁺ , NaHCO ₃ , Cl ⁻	GW-Verunreinigung durch Kunstdünger: K ⁺ und Na ⁺
2. Modifikation der Inhaltsstoffe	SO ₄ ²⁻ (mit der Tiefe abnehmend)		Cl ⁻ und MgO/CaO (teufenabhängig) NaHCO ₃	
3 Relation zwischen Inhaltsstoffen	SO ₄ /Cl; NO ₃ /Cl	MgO/CaO; SO ₄ /Cl	MgO/CaO; SO ₄ /Cl; Ca/Na; HCO ₃ /Cl + SO ₄	

Tab. 4: Hydrochemische Indikatoren und ihre Bedeutung bei der Klärung von Einflussfaktoren.

Lfd. Nr.	Vermuteter Kontaminant	Indikatoren, veränderte bzw. erhöhte Wasserinhaltsstoffe	Bemerkungen
1.	Landwirtschaft		
1.1.	Mineraldüngung – Stickstoffdünger – Kalidünger – Phosphordünger – Phosphordünger mit Magnesium – Kalkung – sog. Ballaststoffe aller Dünger	NO ₃ ⁻ K ⁺ PO ₄ ³⁻ Mg ²⁺ , PO ₄ ³⁻ Ca ²⁺ SO ₄ ²⁻ , Cl ⁻ , Na ⁺ , Ca ²⁺	kaum möglich, oberflächliche Abspülung
1.2	Gülle	NH ₄ ⁺ NO ₃ ⁻ K ⁺	im unmittelbaren Einflussbereich, vor allem bei Havarien – dann sind KMnO ₄ , BSB ₅ ebenfalls erhöht ausser im unmittelbaren Einflussbereich von Havarien (noch nicht aufoxidiert). CSV gleichzeitig erhöht

Tab. 5: Indikatoren für Grundwasserkontaminationen (ALBRECHT u.a., 1977).

Lfd. Nr.	Vermuteter Kontaminant	Indikatoren, veränderte bzw. erhöhte Wasserinhaltsstoffe	Bemerkungen
1.3.	Pflanzenschutzmittel	PO ₄ ³⁻	bei ausreichender Mutterbodenschicht keine Auswaschung untergeordnet
		Cl ⁻ , Na ⁺ organische Stoffe, Schwermetalle	bei ausreichender Mutterbodenschicht keine Gefahr
		nur durch Spezialanalyse bestimmbar; organoleptisch zuerst feststellbare Veränderungen (Geruch, Geschmack, Trübung)	sehr geruchintensive Beeinflussung
2.	Deponien	Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , Fe ²⁺ , Mn ²⁺ , Ca ²⁺ , Na ⁺ , Mg ²⁺ , K ⁺ Spurenmetalle, Fettsäuren, Aldehyde, Alkohole	vor allem in Reduktionszone stark beeinflusste Grundwässer, erhöhte Leitfähigkeit, erhöhter KMnO ₄ -Verbrauch erhöhte Temperatur des Wassers

Tab. 5: Indikatoren für Grundwasserkontamination

Basiseinheiten				Abgeleitete Einheiten			
Bezeichnung, Symbol	Dimension	Einheit	Kurzzeichen	Bezeichnung, Symbol	Dimension	Einheit	Kurzzeichen
Länge, l	L	Meter	m	Druck, p	M · L ⁻¹ · T ⁻²	Pascal	Pa = N · m ⁻²
Masse, m	M	Gramm	g	elektrische Spannung, U	L ² · M · T ⁻³ · I ⁻¹	Volt	V = W · A ⁻¹
Stoffmenge, n	N	Mol	mol	Energie, W	L ² · M · T ⁻²	Joule	J = N · m
Temperatur, T	Θ	Kelvin	K	Frequenz, f	T ⁻¹	Hertz	Hz = s ⁻¹
Zeit, t	T	Sekunde	s	Induktivität, L	L ² · M · T ⁻² · I ⁻²	Henry	H = kg · m ² · s ⁻² · A ⁻²
elektrische Stromstärke, I	I	Ampere	A	Kraft, F	L · M · T ⁻²	Newton	F = kg · m · s ⁻²
Lichtstärke, I	J	Candela	cd	Leistung, P	L ² · M · T ⁻³	Watt	W = J · s ⁻¹
				Leitfähigkeit, κ	L ⁻³ · M ⁻¹ · T ⁻³ · I ²	Siemens/Meter	S m ⁻¹ = A · V ⁻¹ · m ⁻¹
				Radioaktivität, A	T ⁻¹	Becquerel	Bq = s ⁻¹

Tab. 6: Bezeichnung wichtiger Einheiten

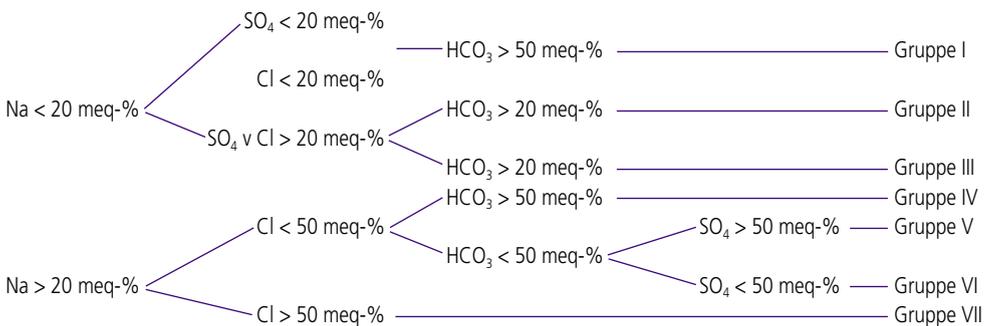
Kombinierte Einheiten		
Bezeichnung	Symbol	Einheit
Beschleunigung, a		m · s ⁻²
Dichte, ρ		kg · m ⁻³
Entropie, S		J · K ⁻¹
Fläche, A		m ²
Geschwindigkeit, v		m · s ⁻¹
Konzentration, c		g · m ⁻³
molare Konzentration, c		mol · m ⁻³
molare Energie, Wm		J · mol ⁻¹
Permeabilität, μ		H · m ⁻¹
Oberflächenspannung, σ		N · m ⁻¹
Viskosität (dynamisch), η		Pa · s = N · s · m ⁻²
Viskosität (kinematisch), ν		m ² · s ⁻¹
Volumen, V		m ³
Wärmekapazität, C		J · K

Tab. 7: Bezeichnung kombinierter Einheiten

Gruppe	Na	Cl	SO ₄	HCO ₃	Einf. Äquivalentkonz. meq/l	Vorkommen	Fehlend
I		< 20	< 20	> 50	3–10	Tertiär, Malm, Dogger, Lias	Keuper, Muschelkalk, Buntsandstein-Perm, Kristallin
II			> 20 < 50	> 20	8–26	Oberer Muschelkalk (+ 2 Dogger-Wässer unter Einfluss von Wässern tieferer Formationen)	Tertiär, Malm, Dogger (2 Ausnahmen), Lias, Keuper, Mittlerer Muschelkalk, Buntsandstein-Perm, Kristallin
III	< 20	> 20 v	> 50	< 20	20–49	Mittlerer Muschelkalk und Keuper (+ im Oberen Muschelkalk unter dem Einfluss dieser Formationen)	Tertiär, Malm, Dogger, Lias, Buntsandstein-Perm, Kristallin
IV			< 50	> 50	2–25	Tiefere Wässer aus Tertiär (zum Teil in Malm und Dogger), Lias, Buntsandstein-Perm, Kristallin	Oberflächennahe Wässer aller Formationen. Tiefere Wässer aus Muschelkalk
V			> 50		21–223	Tiefere Wässer aus Keuper, Oberem Muschelkalk und Buntsandstein-Perm	Oberflächennahe Wässer aller Formationen. Tiefere Wässer aus Tertiär, Jura und Kristallin
VI	> 20		< 50		14–71 (1*)	Tiefere Wässer aus Tertiär, Oberem Muschelkalk und Kristallin *Oberflächennahe Wässer aus Kristallin	Oberflächennahe Wässer aus Sediment-Formationen. Tiefere Wässer aus Jura und Buntsandstein-Perm
VII		> 50	< 50	< 50	15–128 (224)	Tiefere Wässer aus Tertiär (z.T. in Malm), Dogger, (Einfluss Tertiär-Salinar), Oberem Muschelkalk, Buntsandstein-Perm und Kristallin	Oberflächennahe Wässer aller Formationen

Tab. 7: Vorkommen der Wassertypen-Gruppen nach NAGRA.

Schlüssel zur Gruppeneinteilung für chemische Wassertypen (nach Hauptbestandteilen) nach NAGRA



	Ca	Ca - Mg (Mg - Ca)*	Ca - Na	Ca - Na	Na - Ca	Na - Ca	Na
HCO ₃	Tertiär Jura	I Tertiär * Jura	Jura Kristallin				Tertiär Tertiär **
HCO ₃ - SO ₄		II _a Muschelkalk	Jura Kristallin **	Kristallin **	IV Tertiär		Tertiär
HCO ₃ - SO ₄ - Cl HCO ₃ - Cl - SO ₄ HCO ₃ - Cl						Buntsandstein- Perm	Tertiär ** Kristallin
(HCO ₃ - Cl - NO ₃) HCO ₃ - SO ₄ SO ₄ - HCO ₃		II _b Muschelkalk			V _a Tertiär		Tertiär Kristallin
SO ₄ - HCO ₃		II _b Muschelkalk	Muschelkalk	Muschelkalk			
SO ₄	Keuper Muschelkalk	III Keuper Muschelkalk		Muschelkalk	Y Tertiär	Buntsandstein- Perm **	
SO ₄ - HCO ₃ - Cl SO ₄ - Cl - HCO ₃ SO ₄ - Cl				Muschelkalk	Muschelkalk	Buntsandstein- Perm	Keuper Buntsandstein- Perm
HCO ₃ - SO ₄ - Cl bis HCO ₃ - Cl Cl - SO ₄ - HCO ₃ bis Cl - SO ₄ - HCO ₃				Muschelkalk Kristallin	Tertiär VI _a Kristallin	Muschelkalk Kristallin	Tertiär Kristallin
SO ₄ - Cl Cl - SO ₄					Muschelkalk		
Cl - HCO ₃						Jura Kristallin	
Cl - HCO ₃ - SO ₄ Cl - SO ₄ - HCO ₃ Cl - SO ₄						Muschelkalk Buntsandstein- Perm VI _b Kristallin	Tertiär Muschelkalk Buntsandstein- Perm Kristallin
Cl						Jura Kristallin	Tertiär Tertiär ** Muschelkalk Buntsandstein- Perm Kristallin

Tab. 8: Wassertypen nach Hauptbestandteilen nach NAGRA.

Literaturverzeichnis Kap. 5

- Über Theophrastus Bombastus von Hohenheim, genannt Paracelsus (1493–1541), vgl. H. Fischer; Gesnerus 2; 1945. Ferner: C.G. Jung; Paracelsica; Zürich 1941.
- Bodenstein A. (1563): Theophrastus Paracelsus; Baderbüchlin aus mündlichen Übermittlungen.
- Aschner B. (1930): Paracelsus sämtliche Werke; Jena.
- Gessner C. (1553): Excerptorum et observatorum de Thermis in De Balneis.
- Milt B. (1945): Conrad Gessner als Balneologe; in Vierteljahresschrift d. Schweiz. Ges. f. Geschichte der Medizin u. Naturw. 2.
- Ziegler J. (1591–1670);
– (1662) Von dem köstlichen Bad Urdorff; Zürich.
– (1663) Beschreibung dess köstlichen warmen Gesundbads bey Schintznachts; Zürich.
- Wagner J.J. (1680) (1641–1695): J.J. Wagnerus, Historia naturalis Helvetiae curiosa; Tiguri.
- Scheuchzer J.J. (1716) (1672–1733): Von denen mineralischen Wassern des Schweitzerlands; Zürich.
- Scheuchzer J.J.: Hydrographia Helvetica.
- Boulduc (1785): Zergliederung der Mineralwasser von Passy; zit. in L. v. Crell; Chemisches Archiv Bd. 3.
- Senkenberg C.H. (1785): Untersuchung des Mineralwassers von Chiltenham in L. v. Crell, Chemisches Archiv 3.
- Morell C.F. (1788): Chem. Untersuchung einiger bekannter und besuchter Gesundbrunnen und Bäder der Schweiz, insbesondere des Kantons Bern; Bern.
- Ziegler J. (1799): Bemerkungen über gemeines Wasser, natürliche u. künstliche Mineralwässer. Winterthur.
- Ziegler J. (1801): Über die Bereitung künstlicher Mineralwässer; Zürich.
- Kielmeyer (1816): Phys.-chem. Untersuchung des Schwefelwassers v. Stachelberg im Kanton Glarus; Stuttgart.
- Morell C.F. (1820): Helvetischer Almanach.
- Mercanton (1824): Analyse des Eaux de Bex.
- Fueter (1824): Zürcher Neujahrsgeschenke d. Ges. z. Schwarzen Garten.
- Ruesch G. (1825/32): Balneographie; Ebnat.
- Cappeler und Kaiser; zit. von G. Ruesch (1849): Das Bad Pfäfers in seiner neuen Gestalt; St.Gallen.
- Cappeler G.W. und Kaiser J.U. (1826): Die Sauerquellen Graubündens.
- Bauhof (1826): Zürcher Neujahrsgeschenke d. Ges. z. Schwarzen Garten.
- Pagenstecher: Korrespondenznachrichten.
- Löwig C. (1832): Lehrbuch der Chemie; Heidelberg.
- Lavater J.:
– (1836): Europas vorzüglichste Bäder und Heilquellen; Zürich.
– (1836): Geographische Tabellen der Mineralwasser und Bäder in den deutschen Staaten, Ungarn, Frankreich, der Schweiz, Italien, und Grossbritannien mit der Hydrakologie; Zürich.
- von Fellenberg L.R.: Analyse des Schwarzbrunneli zu Gurnigel.
- Simmler R. Th. (1857): Untersuchung des Mineralwassers von Stachelberg; Journ. F. prakt. Chem. 71, 27.
- Meyer-Ahrens C. (1860): Heilquellen und Kurorte der Schweiz; Zürich.
- Lersch B.M.:
– (1855): Einleitung in die Mineralquellenlehre; Erlangen.
– (1857): zweiter Band, Erlangen.
– (1864): Hydrochemie, Handbuch der Chemie der natürlichen Wässer; Berlin.
- Pechier: Naturw. Anzeiger, IV. 37.
- Brunner: Zürcher Neujahrsgeschenke d. Ges. z. Schwarzen Garten.
- Tschokke: Helvetischer Almanach.
- Osann E.: Darstellung der Heilquellen der bekanntesten Länder Europas.
- Vetter A.: Theoretisch-praktisches Handbuch der Heilquellenlehre.
- Gübelin-Litscher O. (1948): Chemische Untersuchung von Mineralwässer; Innsbruck.
- Carlé W. (1975): Die Mineral- und Thermalwässer vom Mitteleuropa; Stuttgart (Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH).
- Högl O. (1980): Die Mineral- und Heilquellen der Schweiz; Bern und Stuttgart (Verlag Paul Haupt).
- Schweizerischer Verein analytischer Chemiker, Eidgenössisches Gesundheitsamt und schweizerische Gesellschaft für Balneologie und Klimatologie (1937): Die Mineral- und Heilquellen der Schweiz; Bern (Verlag Zimmermann & Cie. AG).
- Schmassmann H.: Geologische Beschaffenheit der schweizerischen Mineral- und Thermalwässer; in Offizin Regio (Thermen der Schweiz S. 177–189).

Verzeichnis Sponsoren

Die vorliegende Publikation konnte nur dank der grosszügigen finanziellen Unterstützung unserer Sponsoren erarbeitet und unseren Berufskollegen zugänglich gemacht werden.

Die Mehrzahl der Sponsoren haben uns seit Beginn der Forschungsarbeit an der ETHZ im Jahr 1993 begleitet, andere kamen später hinzu. An diesen Firmen und Institutionen sei an dieser Stelle nochmals ganz herzlich gedankt.

Bauabdichtungs AG, CH-8902 Urdorf

BGS Bau Guss AG, CH-4624 Härkingen

BLS Alp Transit AG, CH-3011 Bern

Breisgauer Portland Cementfabrik GmbH
D-79580 Efringen-Kirchen

Conica AG, CH-8207 Schaffhausen

Creabeton Baustoffe AG,
CH-6221 Rickenbach LU

Deurotherm Isolierbau AG, CH-5000 Aarau

Dyckerhoff Ausbauprodukte AG
CH-4565 Recherswil

Eacon AG, CH-8853 Lachen

ETH Forschung, CH-8092 Zürich

Fritschi Bauelemente AG,
CH-4617 Gunzgen

Holcim, CH-5301 Station Siggental

Hydroisotop GmbH,
D-85301 Schweitenkirchen

INC Bauchemie AG, CH-6330 Cham

Institut Bachema AG, Analytische
Laboratorien, CH-8952 Schlieren

Laborprüfinstitut LPM AG,
CH-5712 Beinwil am See

MBT (Schweiz) AG, CH-8048 Zürich

Nagra, CH-5430 Wettingen

NOK, CH-5401 Baden

Notter Kanaldicht AG, CH-5623 Boswil

PVS Bauabdichtungsbahnen AG
CH-8627 Grüningen

Rüttimann Bau- Engineering AG
CH-7408 Cazis

Sarnafil AG, CH-6060 Sarnen

SBB Alp Transit Gotthard AG,
CH-3030 Bern

Sika AG, CH-8048 Zürich

Stahl Gerlafingen AG, CH-4563 Gerlafingen

Stiftung zur Förderung des Bauwesens an der
ETH Zürich
CH-8092 Zürich

TFB Forschung und Beratung
für Zement und Beton,
CH-5103 Wildegg

Tecton AG Pfäffikon, CH-8330 Pfäffikon

U.C.M. Heidelberg GmbH,
D-69123 Heidelberg

Verband Schweizerischer Elektrizitätsunter-
nehmen VSE/AES,
CH-8001 Zürich

Weidmann Plastics Technology AG,
CH-8640 Rapperswil

Willich Fosroc AG, CH-8953 Dietikon 2

Spezialist für alle Drainage- und Entwässerungssysteme des Tiefbaus

Unser Leistungsangebot

- Projektierung der Entwässerungssysteme bei Neubauten
- Hydrologische Baubegleitung und Beurteilung
- Sanierungsprojekte
- Unterhalt bestehender Entwässerungsanlagen
- Expertisen aller Art

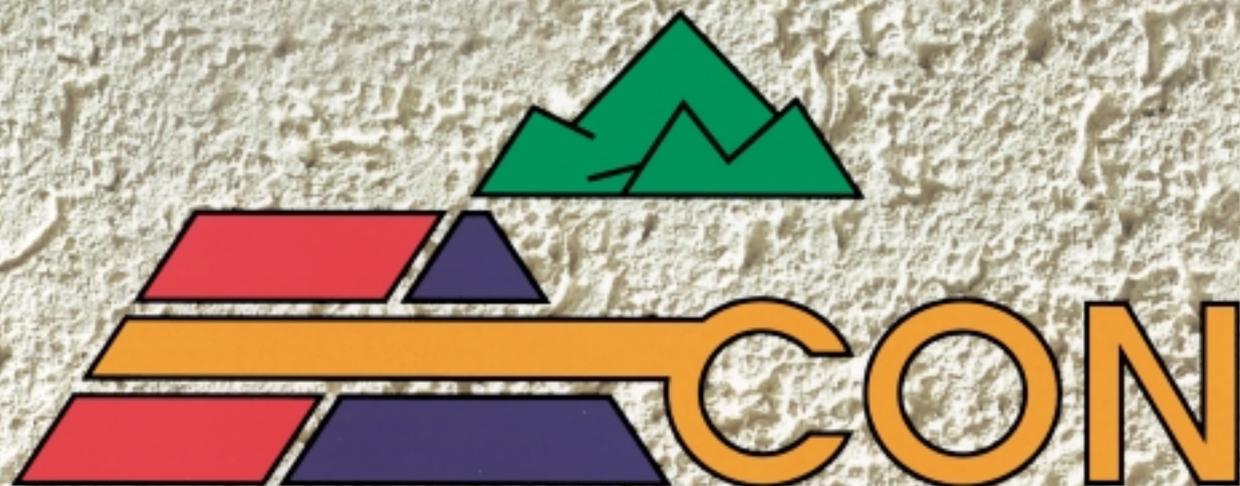
Wir beantworten Ihnen Fragen zu den Themen:

Unsere Kernkompetenzen

- **Verhinderung von Versinterungen**
Möglichkeiten und Grenzen verschiedener Varianten
Kosten/Nutzen-Analysen
- **Härtestabilisation**
Kostenvergleich, Planung, Bau, Betrieb und Unterhalt der Anlagen
- **Versinterungshohlräume**
Dimensionierung und Ausbildung
- **Drainage- und Entwässerungssysteme**
Konzepte, Dimensionierung, Ausbildung, Materialwahl
- **Korrosionsgefahr durch Bergwasser**
Beurteilung, Schutzkonzepte, Alternativen

**Schwierige Fragen betrachten wir als Herausforderung.
Zögern Sie nicht uns anzurufen, wir beraten Sie gerne:**

**Ingenieur-Büro M.C.Wegmüller
Marktgasse 5, 4051 Basel, 061 261 41 42
Bosenhaldenweg 28, 4125 Riehen, 061 641 40 42**



europaean american construction products

IHR PARTNER FÜR:

**Injektionen
Abdichtungen
Bodenstabilisierungen
Gesteinsverfestigungen**

INNOVATION

**Injektionsmaterialien aus PU
Ein- und Zweikomponentenprodukte für diverse Anwendungen
alterungsbeständig, flexibel, FCKW- und lösungsmittelfrei
trinkwassertauglich**

**Neuheimstrasse 18a
CH-8853 Lachen SZ
Tel. +41 +55 442 60 73
Fax +41 +55 442 60 83**

TRETEC AG

Elektrik Mechanik Bautechnik

Feldli, 3855 Schwanden b. Brienz

Tel. 033 951 40 50 Fax 033 951 40 51

Kleinstwassermengenfänger
Minipackersysteme



HYDROISOTOP gmbh
Laboratorium zur Bestimmung von Isotopen in Umwelt und Hydrologie

Isotopenhydrologische und hydrochemische Untersuchungen



von Grund- und Oberflächenwasser, Mineral-, Heil- und Thermalwasser sowie Deponien und Altlasten



Interpretation und Bewertung der Ergebnisse unter Berücksichtigung der geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten

Hydroisotop GmbH
Wolkestrasse 9
D-85301 Schweitenkirchen

Tel. 08444 928 90
0700/Hydroiso (24Pf/min)
Fax 08444 928 929
email: info@Hydroisotop.de
Internet: www.Hydroisotop.de



AVT Anker + Vorspanntechnik AG Tirant + Précontrainte SA

Mariahilfstrasse 51, 1712 Tafers
Tel. 026 494 58 58, Fax 026 494 58 59
E-mail: info@avt-tafers.ch

AVT – Ihr zuverlässiger Partner für alle Verankerungsprobleme

AVT – auch Spezialist für Vorspanntechnik, Klebarmierung, Verstärkungen

Felssicherung Hinter Born
an der A1 bei Gungzen



Ihr Partner für eine intakte Umwelt



CREABETON Baustoff AG: Bremgarten AG, Brugg AG, Rickenbach LU, Triengen LU, Zell LU, Stansstad/Rozloch NW, Flawil SG, Schmerikon SG, Däniken SO, Lindau/Tagelswangen ZH.

CREABETON 

creaphone 0848 800 100
www.creabeton.ch

Ihre führenden und kompetenten Ansprechpartner für:

- G F K - Ankertechnik
- Klebepatronen / Injektionsharze
- Sollelampen

WEIDMANN
PLASTICS TECHNOLOGY

Neue Jonastrasse 60
Postfach 1074
CH - 8100 Bapperswil

Tele. + 41 552 214 106
Fax + 41 552 214 681



H P äberchl
Industriestrasse 52 Postfach 20
CH - 8112 Oteltingen/ZH

Tele. + 41 44 129 18
Fax + 41 44 25 86

Sichern Sie sich die Kompetenz der Rüttimänner:

- Bauwerksuntersuchungen:
Ausarbeiten von Lösungsvorschlägen
- Betonsanierungen/Spritzbeton
- Beschichtungen und Abdichtungen, starr,
mit Flüssigkunststoffen und Dichtungsbahnen
- Injektionen, dichtend und kraftschlüssig mit PU,
Alcali-Silikat, Epoxi und Feinstbindemitteln

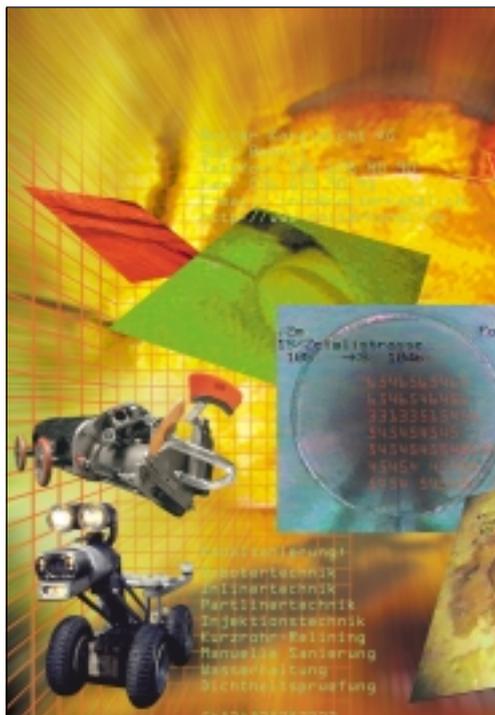
Sparen Sie Geld mit unserem Bau-Know-how.

Rüttimann Bau-Engineering AG
Unterrealta
CH-7408 Cazis GR
Telefon +41 81 630 03 30
Telefax +41 81 630 03 35

Niederlassung in CH-7505 Celerina GR
Partnerbetrieb in CH-6533 Lumino TI



Die Rüttimänner®



Jeder Kanal hat seinen Notter.

Robotertechnik
 Inlinertechnik
 Partlinertechnik
 Injektionstechnik
 Kurzrohr-Relining
 Manuelle Sanierung
 Wasserhaltung
 Dichtheitsprüfung

NOTTER®
KANALDICHT

Notter Kanaldicht AG
 5623 Boswil
 Tel 056 678 90 90
 Fax 056 678 90 91
<http://www.notterkanal.ch>

ISO 9001 zertifiziert
 Reg.-Nr. 13274



ERKENNEN SIE IHR ALTES AUTO WIEDER?

Die Wiederverwertung von
 Alteisen bringt ein total
 neues, absolut erstklassiges
 Material hervor. Es lässt in
 nichts an seine früheren
 Aufgaben erinnern.

Das Verwerten von Schrott
 ist unser Metier.


Stahl Gerlafingen

Stahl Gerlafingen AG, CH-4563 Gerlafingen
 Telefon 032 - 674 22 22
 Ein Unternehmen der **Swiss Steel**



TUNNELBAU

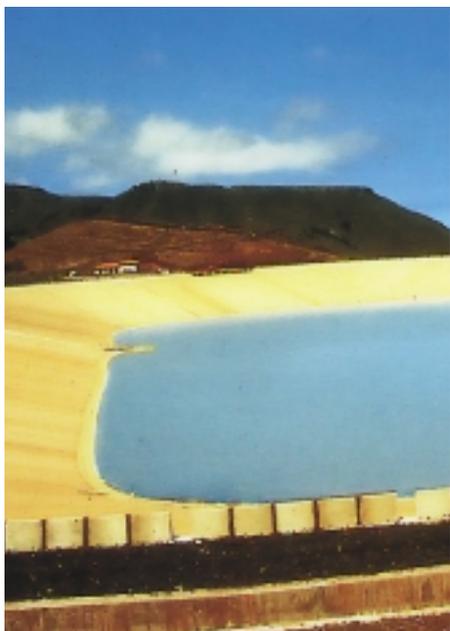
Fortschritt durch Transparenz

Sicherheit durch visuelle Qualitätskontrolle

In 15 Jahren über 2 Mio m² transparente Folie verlegt

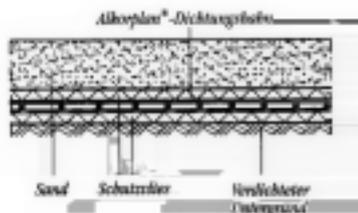
Projektbezogene Ausarbeitung von Systemlösungen

System-Zulassung ALP-TRANSIT
Referenzen: CH, D, F, A



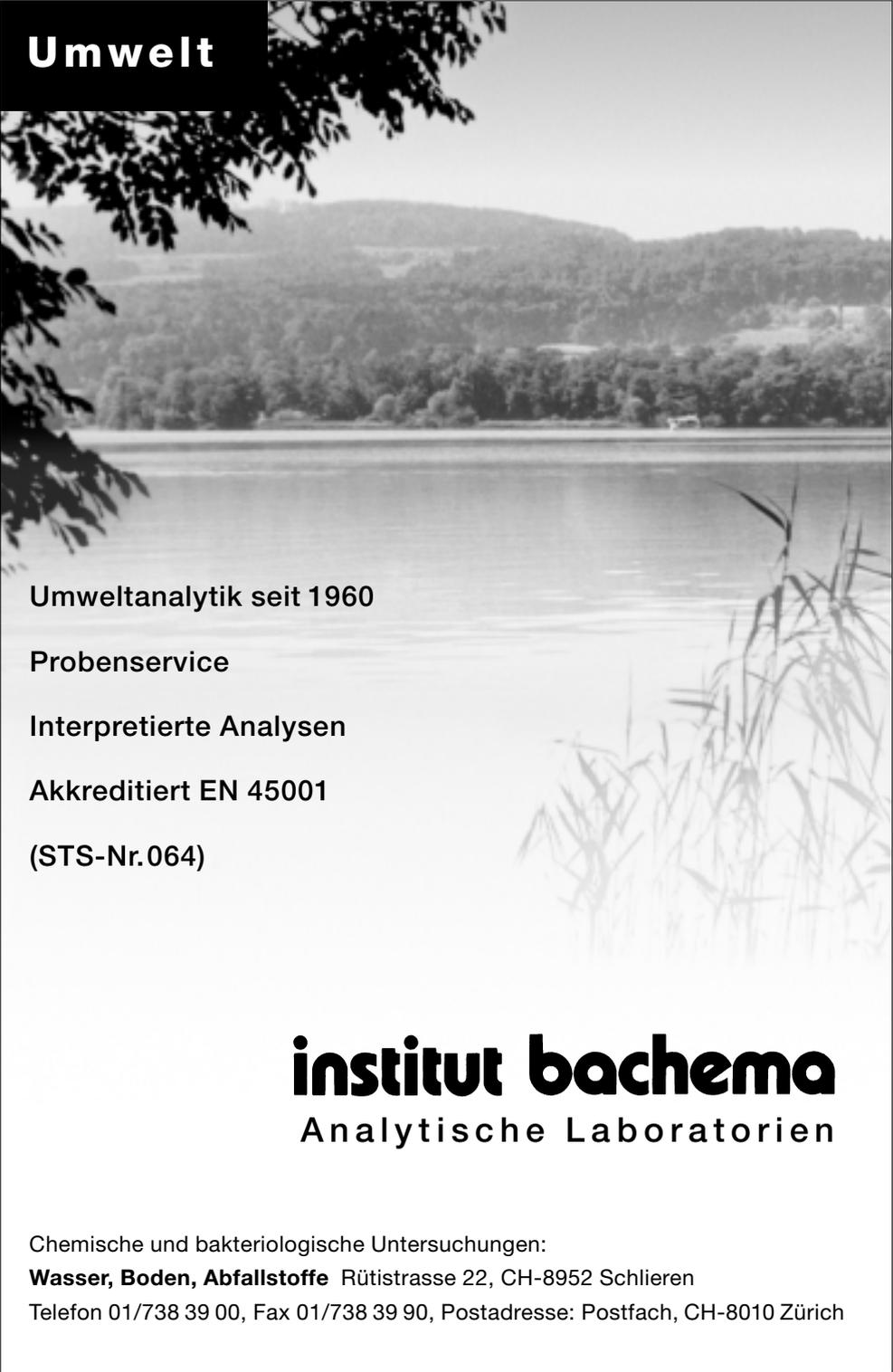
WASSERBAU

Hier können Sie auf Sand bauen



Mehr als 150 Mio m² verlegte
Qualitäts-Produkte der
SOLVAY-ALKOR-GRUPPE

PVS Bauabdichtungsbahnen AG
Hüferen 7, CH - 8627 Grüningen
Tel.: +41 1 935 52 62
Fax: +41 1 935 52 63



Umwelt

Umweltanalytik seit 1960

Probenservice

Interpretierte Analysen

Akkreditiert EN 45001

(STS-Nr.064)

institut bachema
Analytische Laboratorien

Chemische und bakteriologische Untersuchungen:

Wasser, Boden, Abfallstoffe Rütistrasse 22, CH-8952 Schlieren

Telefon 01/738 39 00, Fax 01/738 39 90, Postadresse: Postfach, CH-8010 Zürich



Service total!

www.carey.com

Schweiz:
MBT International
Underground Construction Group
 8048 Zürich
 Tel +41-1-438 22 10
 Fax +41-1-438 22 46

MBT (Schweiz) AG
Meynadier
 8048 Zürich
 Tel +41-1-438 22 11
 Fax +41-1-438 24 15

Geräte und Maschinen:
MEYCO Equipment
 8404 Winterthur / Schweiz
 Tel +41-52-244 07 00
 Fax +41-52-244 07 07

www.ugc.mbt.com



Master Builders
Technologies

Deutschland:
Woermann Bauchemie
GmbH & Co. KG
 Darmstadt
 Tel 06151-854 0
 Fax 06151-854 52

Österreich:
MBT Austria
Bauchemie GmbH
 Lanzendorf
 Tel 02235-475 75 0
 Fax 02235-421 29

Building Tomorrow Together

skw.mbt



Dichten Kleben Dämpfen Verstärken Schützen

Wir beherrschen die Materie

Wachsende Stärke und unser verbreitetes Spektrum der Forschung und Entwicklung ermöglichen die noch schnellere Einführung von Produkten, einen höheren Kundennutzen dank den Sika-Leadtechnologien sowie die Effizienzsteigerung der Produktionsprozesse.

Mit diesem Vorsprung werden wir weltweit den unterschiedlichen technischen Bedürfnissen unserer Kunden gerecht. Wir stehen auf fünf Kontinenten, in über 70 Ländern und in 58 davon mit eigenen Gesellschaften unseren Partnern zur Verfügung.

Für Gebäude, Infrastrukturen und Baukomponenten, für Automobile und Fahrzeuge des Massentransports sowie bei der Konstruktion von Geräten und Maschinen.



S&W

Sika AG, Postfach, CH-8048 Zürich, Tel. 01/436 40 40, www.sika.com





L P M

LPM AG
Labor für Prüfung und
Materialtechnologie
Törrenweg 10
5712 Belvel am See
Telefon: 062 771 55 55
Telefax: 062 771 55 64
admin@lpm.ch

Ihre Zufriedenheit
Qualitätsdienstleistungen zum günstigen Preis: schnell - zuverlässig - souverän.

ist unsere beste Werbung

Professionelle und präzise Diagnosen bei Bauinstandsetzungen.

seit über 30 Jahren



**Kompetente Partner
für unsere Kunden**

BGS
BAU GUSS AG

Überzeugen Sie sich
von unserem Angebot:

- Vielseitiges Produktesortiment
- Komplette Systeme erhältlich
- Hoher Qualitätsstandard
- Technische Unterstützung
- Hohe Lieferbereitschaft

*Flexibilität und eine stets hohe
Lieferbereitschaft mit einem
interessanten Preis-Leistungs-
verhältnis sind die Voraus-
setzungen für eine echte
Partnerschaft mit Ihnen.
Und genau dies ist unser Ziel.*

**Setzt Maßstäbe in der
Entwässerungstechnik**

BGS Bau Guss AG
Altgraben 441
4624 Härkingen
Tel. 062 / 398 00 60
Fax 062 / 398 00 65



Willich Fosroc AG

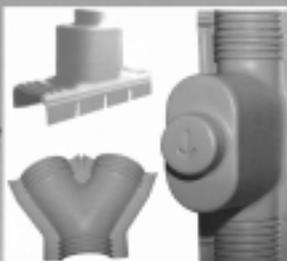
Qualität ist unsere Stärke

Vorabdichtung
mit dem ALPHA- und OMEGA-System



Die Wasserhaltung und die Vorabdichtung erfüllen bei Tunnel-Neubauten und auch bei Sanierungen eine wichtige Aufgabe, die maßgebend das gute Gelingen der Arbeiten beeinflusst.

Zu beiden Systemen (ALPHA-Drain versenkt, OMEGA-Drain aufliegend) gehört ein umfassendes Formstück-Programm.



Sowohl die Kanäle wie auch die Formstücke werden aus einem widerstandsfähigen PE-Material geformt.

- ▲ Injektionssysteme
- ▲ Ankersysteme
- ▲ Klebpatronen
- ▲ Hohlraumverfüllsysteme
- ▲ Trockenbaustoffe
- ▲ Verarbeitungsgeräte und Zubehör



Willich



Willich Fosroc AG
Bernstrasse 88, CH-8953 Dietikon 2
Tel. +41-1-740 91 22, Fax +41-1-740 88 92
e-Mail: info@willich-fosroc.ch

Gegen alkalische und sulfathaltige Bergwässer wächst seit 25 Jahren ein «Kraut» – Polymerbeton aus dem Hause Fritschi Gunzgen.

- 1976 Hauenstein-Basistunnel (SBB), Entwässerungsrinnen 7,25 km
 - 1991 Lötschberg-Tunnel (BLS), Spezialschächte
 - 1993 Bözberg-Tunnel (A3), Spezialschächte
 - 1994 Tunnel Mont Terri, (A16), Schlitzrinnen 3,94 km
 - 1998 Oberländer Tunnels (A6), Schlitzrinnen 9,0 km
 - 2000 Baregg Tunnel (A1), Sanierung, Schlitzrinnen und Schächte 3,5 km
 - 2001 Belchentunnel (A2), Schlitzrinnen und Schächte 6,5 km
- Dutzende weiterer Referenzen belegen nebst einschlägigen Prüf-Gutachten die Resistenz des Werkstoffes Polymerbeton gegen mineralische, ölige, saure und basische Abwässer.



Der Langzeitwerkstoff Polymerbeton zeichnet sich auch durch hohe Abriebfestigkeit aus. Seine hydraulisch glatten Oberflächen halten Höchstdruck und mechanischen Reinigungssystemen stand.



**Fritschi
Bauelemente AG**
Allmend
4617 Gunzgen

Telefon +41 62 - 209 40 50
Telefax +41 62 - 209 40 55
www.polymerbeton.ch
fritschi@polymerbeton.ch

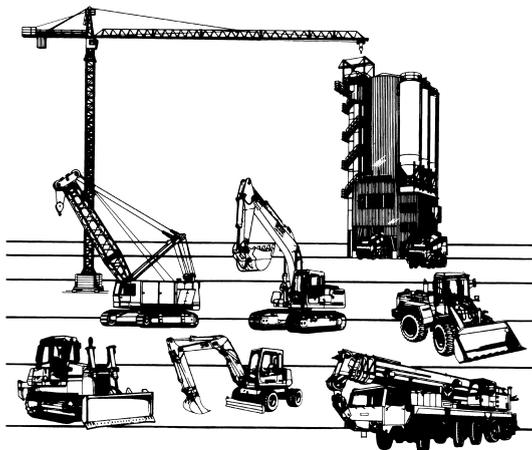
Das grosse Programm.

Liebherr ist ein leistungsfähiger Partner. Seit Jahrzehnten bekannt für Spitzenleistung auf vielen Gebieten der Technik.

19 500 Mitarbeiter sorgen für die Qualität unserer Produkte. Mit unserem grossen Baumaschinenprogramm, im Güterumschlag, im Maschinen- und Anlagenbau, in der Luftfahrt und mit Produkten für den Haushalt.

Viele wichtige Komponenten unserer Produkte werden in der Schweiz hergestellt. Zum Beispiel Dieselmotoren, Hydraulikaggregate und Getriebe.

Mit unseren Produkten sind wir auch in der Schweiz sehr erfolgreich.



LIEBHERR-BAUMASCHINEN AG
Industrieweg 31 • CH-4852 Rothrist
Tel. 062 785 81 11

LIEBHERR

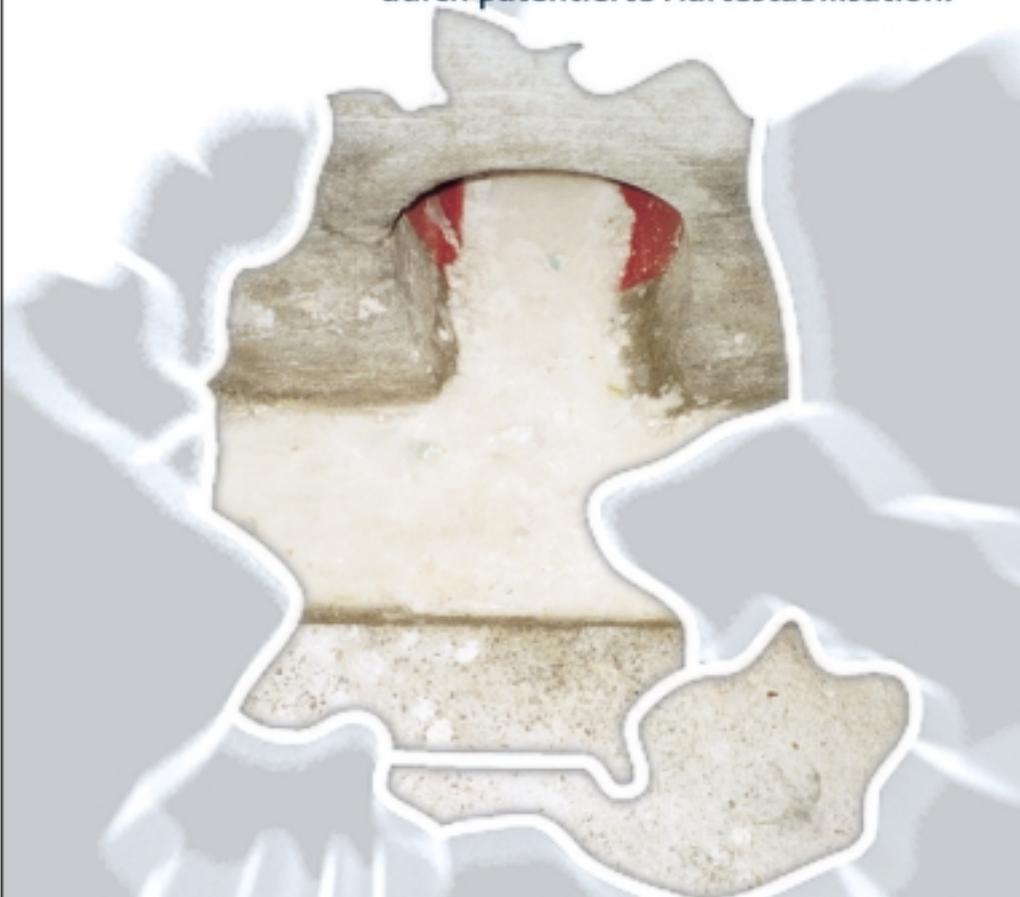
 **VIGIER** - Zemente
VIGIERCEMENTAG-2603 Péry für dauerhafte Bauwerke

www.vicem.ch

The advertisement features a photograph of a large concrete bridge with a prominent arch under construction. The bridge spans a river or valley. The sky is clear and blue. The text is overlaid on the top left of the image.

Versinterung?

-
-
- Verhinderung von Kalkablagerungen durch patentierte Härtestabilisation.



Exklusiver Lizenznehmer für Deutschland und Österreich:

-
-
-

U.C.M. Heidelberg GmbH
Umwelt · Consulting · Management

Ihre Ansprechpartner:

Prof. Dipl.-Ing.
Herwig Seidl

Laubengasse 2
A-8605 Kapfenberg
Telefon +43 (0) 6 76/4 70 35 75
Telefax +43 (0) 38 62/2 17 12

Helmut Gall

Waldhofer Straße 102
D-69123 Heidelberg
Telefon +49 (0) 62 21/82 56 64
Telefax +49 (0) 62 21/82 56 61
E-Mail UCNGmbH@aol.com



Bau Abdichtungs AG

Steinackerstrasse 31 B
8902 Urdorf
Telefon 01/735 19 79
Telefax 01/735 19 89



**Durchdringungsfreie
korrosionsgeschützte
Ankersysteme
für flexible Abdichtungen**

