

Zeitschrift: Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Solothurn
Herausgeber: Naturforschende Gesellschaft Solothurn
Band: 27 (1977)

Artikel: Die Mineral- und Thermalwässer von Bad Lostorf
Autor: Schmassmann, Hansjörg
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-543285>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 08.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

DIE MINERAL- UND THERMALWÄSSER VON BAD LOSTORF

Von
HANS JÖRG SCHMASSMANN

INHALTSVERZEICHNIS

<i>Zusammenfassung</i>	153
1. <i>Vorgeschichte und Bohrungen 1969–1973</i>	167
1.1 Alte Mineralwasserfassungen von Bad Lostorf (Mineralwässer 1 und 2) ...	167
1.2 Neufassung 1969 der Schwefel-Natrium-Chlorid-Subtherme (Bohrung 1, Mineralwasser 2)	167
1.3 Sondierbohrung 1971 und Erschließung der neuen Schwefel-Calcium-Sulfat-Therme (Bohrung 2, Mineralwasser 3a)	168
1.4 Bohrung 1972 und Erschließung der neuen schwefelfreien Therme (Bohrung 3, Mineralwässer 3b und 4).....	168
1.5 Definitive Fassung 1973 der neuen Schwefel-Gips-Therme (Bohrung 4, Mineralwasser 3c)	170
2. <i>Tektonik (Gebirgsbau)</i>	171
2.1 Allgemeines	171
2.2 Leutschenberg-Südschenkel	176
2.3 Schuppen des Leutschenberg-Südschenkels in Bohrung 3	177
2.4 Kern der Hauenstein-Antiklinale	178
2.5 Dottenberg-Südschenkel (Dottenberg-Aufschiebung).....	179
2.6 Tektonische Verhältnisse südlich der Bohrungen	181
2.7 Falkenstein-Gleitpaket	181
2.8 Querstörung von Lostorf	182
2.9 Sockel des Faltenjuras	183
3. <i>Stratigraphie (Schichtenfolge)</i>	186
3.1 Methodik und Allgemeines	186
3.11 – Cuttings	186
3.12 – Kernbohrungen	186
3.13 – Geophysikalische Bohrlochmessungen	186
3.14 – Schichtneigung und Schichtmächtigkeiten	187
3.15 – Repetition von Schichtenfolgen	187
3.16 – Bohrprofile	188
3.2 Trias	194
3.21 – Mittlerer Muschelkalk	194
3.22 – Trochitenkalke	195
3.23 – Plattenkalke	195
3.24 – Trigonodusdolomit	196
3.25 – Unterer Keuper	196
3.26 – Gipskeuper	197
3.27 – Untere bunte Mergel- und Schilfsandsteingruppe	199
3.28 – Hauptsteinmergel und Obere bunte Mergel	200
3.3 Jura	200
3.31 – Lias	200
3.32 – Dogger	201

4. Mineralwasser Lostorf 2	203
4.1 Fassung (Bohrung 1)	203
4.2 Schichtung des Wassers	203
4.3 Abhängigkeit der Druckhöhen von den Niederschagen	203
4.31 – Schwankungen der Druckhöhen (Wasserspiegel und artesischer Überlauf)	203
4.32 – Statistische Prüfungen kurzfristiger Abhängigkeiten	203
4.33 – Jahreszeitliche Abhängigkeit	207
4.4 Pumpversuch	209
4.5 Chemische Beschaffenheit und Temperatur des Wassers	210
4.51 – Beziehungen zwischen Chlorid-, Natrium- und Magnesium-Konzentrationen, Temperatur und Schwefelwasserstoff-Gehalt	210
4.52 – Beziehungen zwischen Chlorid-Konzentration, Härten und Kalium-Konzentration	211
4.53 – Berechnete Beschaffenheit des Mineralwassers und des beigemischten Fremdwassers	214
4.54 – Änderungen der Beschaffenheit während der Pumpversuche	216
4.55 – Chemischer Charakter	220
5. Mineralwasser Lostorf 3	227
5.1 Sondierbohrungen (und Fassung)	227
5.11 – Bohrung 2 (Mineralwasser Lostorf 3a)	227
5.12 – Bohrung 3 (Mineralwasser Lostorf 3b)	227
5.13 – Bohrung 4 (Mineralwasser Lostorf 3c)	227
5.2 Druckhöhen des Mineralwassers	228
5.3 Pumpversuche	228
5.4 Auswertung der Pumpversuche	230
5.41 – Verfahren	230
5.42 – Durchlässigkeit des Aquifers	231
5.43 – Reichweite der Entnahme und Speicherkoefﬁzient	235
5.5 Beschaffenheit des Wassers	236
5.51 – Temperaturen	236
5.52 – Geloste Bestandteile	237
5.53 – Kohlensäuregehalt	239
5.54 – Freies Quellgas	239
5.55 – Bakteriologie	240
5.6 Nutzungsmöglichkeiten	240
6. Mineralwasser Lostorf 4	241
6.1 Fassung	241
6.2 Auslauf- und Pumpversuche	241
6.3 Beziehungen zwischen Auslaufmengen und Druckhöhen	241
6.4 Durchlässigkeit des Aquifers	246
6.5 Druckanstiege bei Unterbrüchen des Auslaufs	246
6.6 Beschaffenheit des Wassers	247
6.61 – Temperaturen	247
6.62 – Chemische Beschaffenheit des Wassers	247
6.63 – Kohlensäure- und Sauerstoff-Gehalt	249
6.64 – Freies Quellgas	249

6.65 – Bakteriologie	251
6.7 Nutzungsmöglichkeiten	251
<i>7. Ergänzende Daten zur genetischen Beurteilung der Mineralwässer</i>	253
7.1 Tritium- und Sauerstoff-18-Bestimmungen	253
7.11 – Meßeinheiten	253
7.12 – Meßergebnisse	253
7.13 – Beurteilung des Tritium-Gehalts	253
7.14 – Beurteilung des Sauerstoff-18-Gehalts	255
7.2 Wässer im Hauensteinbasistunnel	256
7.21 – Allgemeines	256
7.22 – Aquifer des Mineralwassers Lostorf 3	256
7.23 – Aquifer des Mineralwassers Lostorf 4	260
7.24 – Mengenanteile	260
<i>8. Genese der Mineralwässer von Bad Lostorf</i>	262
8.1 Mineralwasser Lostorf 4	262
8.11 – Aquifer und Einzugsgebiet	262
8.12 – Erwärmung	263
8.13 – Mineralisationstyp des Muschelkalkwassers	265
8.14 – Ursachen der Mineralisation	265
8.15 – Magnesium-Gehalt und Modelle der Lösungsvorgänge	267
8.16 – Sauerstoffschwund und Eisen	269
8.2 Mineralwasser Lostorf 3	271
8.21 – Aquifer und Temperatur	271
8.22 – Schwefelwässer im südlichen Faltenjura	271
8.23 – Hypothetischer Zufluß aus dem Untergrund des Molassebeckens	272
8.24 – Hypothetisches Einzugsgebiet am Nordrand des Aarmassivs	273
8.25 – Hypothese einer Herkunft aus dem Jura	274
8.26 – Mineralisationstyp	276
8.27 – Schwefelwasserstoff und Gesamtkohlensäuregehalt	276
8.28 – Magnesium-Gehalt und Modelle der Lösungsvorgänge	278
8.3 Mineralwasser Lostorf 2	280
<i>9. Balneologischer Charakter der Wässer</i>	282
9.1 Chemischer und thermischer Charakter	282
9.2 Bezeichnung nach der schweizerischen Lebensmittelverordnung	282
9.3 Balneologische Verwendungsmöglichkeiten und verfügbare Mengen	287
<i>10. Anhang</i>	288
10.1 Erläuterung der Analysen-Einheiten	288
10.2 Literatur	288

Zusammenfassung

EINFÜHRUNG IN DIE GEOLOGIE VON BAD LOSTORF

In Bad Lostorf sind in einem Umkreis von nur 410 m vier Mineralwässer gefaßt, deren Beschaffenheit sehr unterschiedlich ist. Diese einzigartige Vielfalt an Mineralwässern verdankt Bad Lostorf seiner besonderen geologischen Lage am Südfuß des Faltenjuras.

Schichten des Jura¹ und des Trias-Systems bauen hier das Gebirge auf (Fig. 5). Sie werden von oben nach unten, d. h. vom Jüngeren zum Älteren in folgende Serien gegliedert:

Jura	{ Malm	Trias	{ Keuper
	Dogger		Muschelkalk
	Lias		Buntsandstein

Für die Entstehung der Mineralwässer von Bad Lostorf sind Keuper und Muschelkalk² bedeutsam. In den Profilen der bei Bad Lostorf abgeteuften Bohrungen können wir summarisch folgende Schichten unterscheiden:

115 m Mittlerer Keuper, gegliedert in:

- 18 m: Obere bunte Mergel, Hauptsteinmergel (Dolomite),³
Untere bunte Mergel und Schilfsandsteingruppe
(hier in toniger Ausbildung);
- 97 m: Gipskeuper: Tonmergel mit Gips und Anhydrit.⁴

3 m Unterer Keuper: Dolomite und Mergel.

57 m Oberer Muschelkalk, gegliedert in:

- 18 m: Trigonodusdolomit⁵
 - 22 m: Plattenkalke
 - 17 m: Trochitenkalke⁶
- } Hauptmuschelkalk.

¹ Mit dem sich ursprünglich nur auf das Gebirge beziehenden Namen Jura werden weltweit in anderer Bedeutung auch die in einer bestimmten geologischen Zeit abgelagerten Schichten bezeichnet. Die das Jura-Gebirge aufbauenden Schichten gehören nur zum Teil dem Jura-System an.

² Mit Muschelkalk wird eine Serie von Schichten bezeichnet, die nur zum Teil aus Kalken, im übrigen aber aus Dolomiten, Tonmergeln und Gips-, Anhydrit- und Steinsalzlagern bestehen.

³ Gestein aus Calcium-Magnesium-Karbonat.

⁴ Gips ist Calciumsulfat mit, Anhydrit solches ohne Kristallwasser.

⁵ Formation aus Dolomiten, nach der Muschel *Trigonodus* benannt.

⁶ Formation aus Kalken, nach dem Vorkommen von Trochiten = Stielglieder von Seelilien benannt.

75 m Mittlerer Muschelkalk, obere zwei Zonen:

10 m: Dolomitzone;

65 m: Obere Sulfatzone: Tonmergel mit Gips und Anhydrit.

Die Längen der mit den Bohrungen in den einzelnen Schichten durchfahrenen Strecken sind wegen der geneigten Schichtlagerung größer als die Schichtmächtigkeiten (Fig. 2).

Der Obere Keuper (Rhät) fehlt im Gebiet von Lostorf. Der untere Teil des Mittleren Muschelkalks und die unter ihm liegenden Schichten sind nicht in die Jurafaltung einbezogen worden.

In anderer Ausbildung als bei Lostorf, vorwiegend als durchlässige Kalke und Dolomite, bedecken Schichten des Jura- und des Trias-Systems, dazu solche des jüngeren Kreide-Systems, auch rund 80 km südlich von Bad Lostorf, z.B. in der Gegend von Meiringen, das Aarmassiv. Sie tauchen dort in nördlicher Richtung ab und liegen dann in mehreren tausend Metern Tiefe unter den bei der Entstehung des Gebirges von Süden über das Aarmassiv hinweg verfrachteten mächtigen alpinen Deckenpaketen, weiter nördlich unter den Ablagerungen der mittelländischen Molasse⁷ (Fig. 3).

In einer ersten Jurafalte sind am Engelberg, dem östlichen Ausläufer des Borns, 6–7 km südlich Bad Lostorf zunächst die Schichten des Malms hochgepresst, legen sich aber nach Norden unter dem Aaretal zu einer breiten flachen Mulde (Aaretal-Synklinale). Erst bei Bad Lostorf sind auch die tiefen Serien (Dogger und Lias) des Jura-Systems und Schichten des Trias-Systems durch die Faltung hochgeschoben (Fig. 3).

Nach unten hört die von der Jurafaltung erfaßte Schichtenfolge im Mittleren Muschelkalk auf. Die Ursache dafür ist das Steinsalzlagert im tieferen Teil des Mittleren Muschelkalks, das sowohl im Norden aus den Salinengebieten des Hochrheintals als auch im Mittelland südlich Bad Lostorf von Erdölbohrungen bekannt ist. In der unter der Oberen Sulfatzone liegenden Steinsalzzone hat der von den Alpen ausgehende Schub die ganze über ihr liegende Schichtplatte abgescherzt. Die durch den Druck von Süden gestoßene Platte ist längs einer etwa durch das Gebiet von Bad Lostorf gehenden Linie von ihrer ursprünglichen Fortsetzung, dem Tafeljura, abgetrennt, im Norden auf die starre Tafel überschoben und dabei in einzelne abgerissene und teils verbogene Schichtplatten und -pakete aufgelöst worden (Fig. 3).

Innerhalb der als Ganzes in der Steinsalzzone abgeschernten Platte richten sich die Schichten zwischen Dorf und Bad Lostorf steil auf (Fig. 2). Kalke des Mittleren Doggers, der sogenannte Hauptrogenstein, bilden unmittelbar südlich des Bades den Kamm des Dottenbergs, auf dem das Schloß Wartenfels steht und der sich ostnordöstlich des Bad und Dorf Lostorf verbindenden Quertals fortsetzt (Fig. 1). Nach jenem markanten Bergkamm bezeichnen wir die ganze von Süden hochgeschobene und dabei steilge-

⁷ Gruppe von Formationen des Tertiär-Systems in dem den Alpen nördlich vorgelagerten Becken.

stellte Schichtplatte als *Dottenberg-Aufschiebung* oder auch *Dottenberg-Südschenkel*.⁸ In den nördlich des Kamms unter den Hauptrogenstein-Kalken auftauchenden, meist tonig-mergeligen und daher weicheren Schichten des Unteren Doggers (mit den Opalinustonen an der Basis), des Lias und des Keupers hat die Erosion die von Westsüdwesten und von Ostnordosten abfallenden und beim Bad Lostorf sich vereinigenden Täler ausgeräumt. Unter dem Keuper haben die 1971–1973 beim Bad Lostorf abgeteuften Bohrungen den Oberen Muschelkalk und die Dolomit- und die Obere Sulfatzone des Mittleren Muschelkalks aufgeschlossen (Fig. 2 und 4).

Die Dottenberg-Aufschiebung ist über eine ehemals nach Norden mit ihr zusammenhängende, dann bei der Gebirgsbildung abgetrennte und ihrerseits auf den Tafeljura überschobenen Schichtplatte hochgepreßt. Diese fällt ebenfalls nach Süden ein, aber flacher als die Dottenberg-Aufschiebung (Fig. 2). Da sie den südlichen Schenkel einer Falte (Antiklinale) bildet, deren Achse nördlich Bad Lostorf in der Nähe des Leutschenbergs verläuft, nennen wir sie *Leutsenberg-Südschenkel* (Fig. 1). Der Kern einer anderen Falte, der Hauenstein-Antiklinale, deren normal ausgebildeter Südschenkel die Dottenberg-Aufschiebung ist, war bei der Gebirgsbildung zerquetscht und auf den Leutsenberg-Südschenkel aufgeschoben worden (Fig. 2); ein Nordschenkel dieser Falte fehlt.

Außer den generell etwa Westnordwest-Ostsüdost verlaufenden Falten und Aufschreibungen finden wir quer zum Gebirge verlaufende Störungen. Mehrere Hinweise bestehen dafür, daß eine solche Querstörung, zwar mit einem kaum wahrnehmbaren Verschiebungsbetrag, aber mit verstärkter Klüftung der Felsschichten, den Durchbruch des Bad und Dorf Lostorf verbindenden und die Dottenberg-Aufschiebung durchschneidenden Quertals begünstigt hat (Fig. 1).

Die geologischen Verhältnisse werden weiter dadurch kompliziert, daß ein riesiges Felspaket mit dem oberen Teil des Unteren Doggers und mit dem Hauptrogenstein des Leutsenberg-Südschenkels nach der Jurafaltung auf südlich einfallenden tonigen Unterdogger-Schichten gegen das im Unteren Dogger, Lias und Keuper des Dottenberg-Südschenkels erodierte Tal abgeglitten ist (Fig. 1 und 2). Das nach dem *Falkenstein* benannte, in sich zerrissene Gleitpaket ist etwa 1 km breit, und sein Abriß ist 1,4 km nördlich von Bad Lostorf noch heute als abflußloses Tälchen augenfällig. Die das Gleitpaket im Osten begrenzende Bewegungsfuge war durch die erwähnte, ältere Querstörung vorgezeichnet. Weitere, kleinere Felsmassen sind östlich des großen Falkenstein-Gleitpaketes gegen den Westsüdwest-Ostnordost verlaufenden Talzug abgeglitten (Fig. 1).

Die bei der Bildung des Juragebirges entstandenen Aufschreibungen abgerissener Schichtplatten und die spätere Abgleitung des höheren Teils einer

⁸ Schenkel = die vom Scheitel einer Falte ausgehenden, den Faltenkern umschließen den Flügel.

dieser Schichtplatten sind der Grund dafür, daß die westlich Bad Lostorf angesetzten Bohrungen verschiedene und teils sich repetierende Schichtfolgen angetroffen haben, nämlich:

- bis 40 m aus dem Leutschenberg-Südschenkel abgeglittenes Falkenstein-Gleitpaket mit Hauptrogenstein (Mittlerer Dogger) und Unterm Dogger;
- bis 393 m Dottenberg-Aufschiebung, etwa 55° gegen Süden einfallend, mit Lias, Keuper, Oberem Muschelkalk sowie Dolomit- und Obere Sulfatzone des Mittleren Muschelkalks;
- bis 424 m zerquetschter, aufgeschobener und nur rudimentär erhaltener Kern der Hauenstein-Antiklinale im Keuper;
- bis 484 m Leutschenberg-Südschenkel, etwas verschuppt, mit Keuper und Oberem Muschelkalk.

Der zeitliche Ablauf der Zustände und Vorgänge, die zu den für die Entstehung der Mineralwässer wichtigen Ablagerungen und Strukturen geführt hatten, war etwa folgender:

- vor 215–190 Millionen Jahren: Trias-Meer, zeitweise seichte Meeresbecken und Lagunen (Sulfatzonen und Steinsalzzone des Mittleren Muschelkalks, Gipskeuper);
- vor 190–140 Millionen Jahren: Jura-Meer;
- vor 65– 5 Millionen Jahren: Entstehung der Alpen südlich des Juras und Ablagerung der Molasse;
- vor 10– 2 Millionen Jahren: Entstehung des Faltenjuras;
- in den letzten 2 Millionen Jahren: Erosion der Täler und Abgleitung des Falkenstein-Gleitpakets.

Mineralwasser Lostorf 1

Die urkundlich erstmals 1412 erwähnte älteste Quelle von Bad Lostorf ist unmittelbar hinter den Badgebäuden gefäßt und liefert ein kaltes gipshaltiges Wasser. Es handelt sich um ein im Gebiet des Falkenstein-Gleitpakets versickertes Wasser, das auf seinem Weg im Kontakt mit dem oberhalb der Fassung vorkommenden und mit Gehängeschutt und mit dem Falkenstein-Gleitpaket bedeckten Gipskeuper des Dottenberg-Südschenkels durch Lösung Gips aufnimmt (Fig.2). Ein Zusammenhang mit den drei anderen Mineralwasservorkommen besteht nicht.

Nachdem 1971–1973 thermale Wässer mit konstanterer Ergiebigkeit und Mineralisation erbohrt worden sind, wird das Mineralwasser Lostorf 1 im Thermalbad nicht mehr balneologisch genutzt. Es wird weiterhin durch die Mineralquelle Lostorf AG als Lostorfer Mineralwasser abgefüllt.

Mineralwasser Lostorf 2

Anfangs des 19. Jahrhunderts war in Bad Lostorf eine zweite Mineralquelle entdeckt worden, die ein subthermales und Natriumchlorid (Kochsalz) enthaltendes Schwefelwasser liefert.

Das Wasser wurde letztmals 1969 am Ort der früheren Fassungen, im sogenannten «Schwefelloch», 150 m östlich des Bades mit der 25 m tiefen *Bohrung 1* (Fig. 1) in 12–22 m Tiefe neu gefaßt, wegen der damals beschränkten Mittel allerdings noch nicht ganz befriedigend.

Die Fassung liegt in dem von Norden bis hieher abgeglittenen Unteren Dogger des Falkenstein- oder des östlich an dieses anschließenden kleineren Gleitpakets (Fig. 1). Das Wasser stammt aber nach seiner Beschaffenheit aus dem Muschelkalk des mit den Gleitmassen bedeckten Dottenberg-Südschenkels. Es tritt genau dort zu Tage, wo der Verlauf der östlichen Bewegungsfuge des Falkenstein-Gleitpakets im Norden und des Taldurchbruchs zwischen Bad und Dorf Lostorf im Süden auf eine das Gebirge querende Störung hinweisen (Fig. 1). Eine unbeabsichtigte Markierung des Wassers bestätigte überraschend die sich aus den geologischen Verhältnissen abzeichnende Querstörung: Wenn in dem 1969 abgeteuften Bohrloch durch die Bohrarbeit oder durch die Entnahme großer Wassermengen turbulente Verhältnisse geschaffen wurden, traten nämlich jeweils kurz danach in einer 500 m südlich über dem Hauptrogenstein des Dottenberg-Südschenkels aus der Sohle des Quertals austretenden Quelle vorübergehend nicht nur Trübungen, sondern auch hohe Chlorid-Gehalte und Schwefelwasserstoff auf. Mineralwasser konnte demnach unter den während der Fassungsarbeiten zeitweise geschaffenen Bedingungen in einer wasserwegsamen Zone gegen Süden abströmen, d. h. in Richtung der anzunehmenden Querstörung.

In der Fassung vermischt sich das zweifellos aus großer Tiefe aufsteigende subthermale, schwefelwasserstoff- und kochsalzhaltige Mineralwasser mit unterschiedlichen Mengen von in den Klüften des Felsuntergrundes zirkulierendem, schwächer mineralisiertem Grundwasser. Doch selbst bei einer Entnahme von 300 l/min betrug der gesamte Mineralgehalt noch mehr als 1 g/l. Um ein möglichst mit keinem mineralärmeren Grundwasser vermischt Mineralwasser zu erhalten, muß die Entnahme aber auf etwa 10 l/min beschränkt werden.

Der Druck des in der Fassung aufsteigenden Wassers ist kurzfristig von den Niederschlägen abhängig. Nach ergiebigen Regenfällen fließen bis zu 70 l/min Wasser am Brunnenkopf artesisch⁹ über. Während trockenen Sommern fällt der Wasserspiegel 1,4 m unter den Brunnenkopf. Bemerkenswerterweise kommt es aber bei Druckanstiegen nach Niederschlägen nicht zu einer Verdünnung des aus der Tiefe gepumpten Wassers. Im Gegenteil läßt

⁹ Artesisch = gespanntes (unter einer undurchlässigen Schicht unter Druck stehendes) Wasser, das aus einer Bohrung (Brunnen) von selbst über Gelände ausläuft.

sich gerade dann das gehaltreichste Wasser gewinnen. Bei artesischem Überdruck fließt nämlich das der Brunnenbohrung in einem höheren Niveau zuströmende und spezifisch leichtere Grundwasser am Brunnenkopf über, so daß über der Brunnensohle das kein oder wenig Fremdwasser enthaltende mineralisierte Tiefenwasser abgepumpt werden kann.

Nach der Analyse von Prof. Dr. O. Högl und Dr. H. SENFTEN aus dem Jahre 1972 entspricht das Wasser in dreifacher Beziehung den in der schweizerischen Lebensmittelverordnung an ein Mineralwasser gestellten Anforderungen. Es ist sowohl ein *Kochsalzwasser* als auch ein *Schwefelwasser* als auch ein *borhaltiges Wasser*. Bei optimaler Entnahme ist es mit Temperaturen über 14° C auch eine *Subtherme*.

Das voll analysierte Wasser, das in einer Menge von 9 l/min gefördert worden war, dessen Zusammensetzung im Vergleich zu zahlreichen Teilanalysen aber noch nicht die optimal mögliche war, hatte einen Schwefelwasserstoffgehalt von 50 mg/l und einen Gesamtmineralgehalt von 2169 mg/l, wovon u.a. 550 mg/l Natrium, 850 mg/l Chloride und 5,6 mg/l Bor.

Die Beschaffenheit des in Mengen um 10 l/min geförderten Wassers hat einen gewissen Schwankungsbereich, der indessen seit der 145 Jahre zurückliegenden ersten Analyse gleich geblieben ist und von anderen Mineralwässern des Juragebirges deutlich abweicht. Der Schwefelwasserstoffgehalt des aus der Tiefe aufsteigenden und mit keinem mineralärmeren Grundwasser vermischten Wasser ist mit mindestens 140 mg/l ungewöhnlich hoch.

Da sich das Wasser bei seinem natürlichen Aufstieg aus der Tiefe abkühlt, ist es nicht thermal, hat aber bei geringer Verdünnung mit höherem Grundwasser doch noch subthermale Temperaturen von über 15° C behalten.

Das Mineralwasser Lostorf 2, d.h. die alte, 1969 mit Bohrung 1 neu gefäßte Schwefelquelle wird im neuen Bad zurzeit nicht mehr genutzt. 1971 ist ein anderes Schwefelwasser (Mineralwasser Lostorf 3) erschlossen worden, das den balneologischen Ansprüchen voll genügt, aber thermal und dem Einfluß mineralärmerer Grundwässer entzogen ist. Im Hinblick auf eine balneologische Diversifikation ist jedoch das zugleich kochsalzhaltige Schwefelwasser der alten Quelle als Reserve zu betrachten.

4. Mineralwasser Lostorf 3

Da weder die alte Gipsquelle (Mineralwasser 1) noch die Natrium-Chlorid-Schwefelquelle (Mineralwasser 2) nach der Ergiebigkeit und nach der Konstanz der Mineralisation für das bereits im Bau befindliche Bad befriedigen konnten, entschloß sich die Bauherrschaft 1971 zu einer ersten tiefen Bohrung, der *Bohrung 2* (Fig. 1 und 2). Sie wurde 200 m westlich des Bades dort geologisch gezielt angesetzt, wo die Dolomite und Kalke des Oberen Muschelkalks als erfolgsversprechendster wasserleitender Horizont sowohl in der Dottenberg-Aufschiebung als auch darunter im Leutschenberg-Süd-

schenkel prognostisch zu erwarten und beide Stockwerke noch in für eine Fassung vernünftigen Tiefen voraussehbar waren (Fig. 2). Die Bohrung 2 wurde wie schon die Bohrung 1 und dann die weiteren Bohrungen 3 und 4 durch die Firma Fehlmann Grundwasserbauten AG ausgeführt. Als sie ab 259,5 m unter undurchlässigen Keuperschichten das oberste Schichtglied des Oberen Muschelkalks, den Trigonodusdolomit, auf 20,5 m durchfahren hatte (Fig. 4), ergab ein Pumpertest, daß mindestens 90 l/min eines Calciumsulfat (Gips) enthaltenden Mineralwassers mit einem Schwefelwasserstoffgehalt von 37 mg/l und einer Temperatur von 27° C gewonnen werden konnten (Mineralwasser Lostorf 3).

Das Ergebnis war zwar balneologisch sehr befriedigend, stand doch nun ein einwandfrei faßbares und geschütztes, von oberflächennahen Grundwässern unbeeinflußtes Schwefelwasser zur Verfügung. Für das im neuen Bad zu errichtende Schwimmbecken war es jedoch erwünscht, zusätzlich ein Wasser verfügbar zu haben, das keinen Schwefelwasserstoff enthält und eine noch größere Ergiebigkeit hat. Der im Leutschenberg-Südschenkel tiefer nochmals zu erwartende Obere Muschelkalk (Fig. 2) gab Hoffnung, daß auch dieses Ziel erreicht werden könnte. Die bis in 280 m abgeteuft, als reine Sondierbohrung konzipierte Bohrung 2 ließ sich jedoch nicht mehr weiter vertiefen. Die von ihr durchfahrenen Gipskeuperstrecken waren derart druckhaft, daß das Bohrloch bei 182 m zusammengedrückt wurde, das Wasser zwar trotzdem noch aufstieß, aber das Bohrgestänge nicht mehr aus dem tieferen Teil des Bohrlochs zurückgezogen werden konnte.

Deshalb wurde 8 m daneben die *Bohrung 3* so angesetzt, daß im Hinblick auf andere mögliche Wasserhorizonte als dem zunächst erwarteten eine Tiefe von mehr als 1000 m hätte erreicht werden können, die Bohrung aber auch zur definitiven Fassung des bereits nachgewiesenen Schwefelwassers geeignet gewesen wäre, wenn die Versuche in größerer Tiefe erfolglos geblieben wären. Als das mit Bohrung 2 auf einer Strecke von nur 20,5 m angeschürfte Mineralwasserstockwerk 1972 mit der neuen Bohrung 3 bei einer Tiefe von 346 m ganz durchfahren worden war, ergab ein Pumpversuch, daß mindestens 600 l/min des thermalen Schwefelwassers gewonnen werden könnten. Nachdem dann in 571–584 m das zusätzlich gewünschte schwefelwasserstofffreie Thermalwasser (Mineralwasser Lostorf 4) gefunden worden war, konnte man jedoch darauf verzichten, diese durch Bohrung 3 im oberen Stockwerk nachgewiesene bedeutende Menge von Schwefelwasser zu nutzen. Das Schwefelwasserstockwerk ist heute in Bohrung 3 abgeschlossen.

Zur definitiven Fassung des Schwefelwassers (Mineralwasser Lostorf 3) wurde 1973 die *Bohrung 4* in je 8 m Entfernung von den Bohrungen 2 und 3 ausgeführt. Da eine wesentlich kleinere Menge als 600 l/min genügte, um den Schwefelwasserbedarf des Bades zu decken, und da im obersten Teil des Stockwerks die höchsten Schwefelwasserstoffgehalte gefunden worden waren, wurde die Bohrung 4 wie vorher Bohrung 2 nur bis 280 m abgeteuft.

Zur Sicherung des Bohrloches sind ab Gelände bis 252,6 m teleskopartig vier Stahlrohrtouren eingebaut. Darunter sind in den tiefsten Teil des Bohrlochs Filterrohre eingesetzt, durch welche das Mineralwasser zufließt. Ein Pumpversuch ergab eine mögliche Entnahme von 170 l/min.

Aus der Tiefe von etwa 260–280 m steigt das Wasser in der zur Fassung ausgebauten Bohrung 4 wie auch in der benachbarten Bohrung 2 bis in die Nähe des Geländes, bleibt aber meistens wenig unter dem Brunnenkopf. Zeitweilen ist der Druck jedoch so groß, daß das Wasser am Brunnenkopf artesisch überläuft. Da in der Tiefe von etwa 260–280 m auf Klüften eine direkte Verbindung besteht, senkt sich das Wasser auch in Bohrung 2 ab, wenn in Bohrung 4 gepumpt wird.

Nach der Analyse von Prof. Dr. O. Högl und Dr. H. Senften entspricht das Mineralwasser Lostorf 3 in vierfacher Beziehung den nach der schweizerischen Lebensmittelverordnung an ein Mineralwasser gestellten Anforderungen. Es ist ein *Schwefelwasser*, eine *Therme*, ein *Gipswasser* und ein *Fluorwasser*. Das Wasser enthält 37 mg/l Schwefelwasserstoff und 2509 mg/l gelöste Mineralbestandteile, wovon u.a. 501 mg/l Calcium, 130 mg/l Magnesium, 1507 mg/l Sulfat und 2,4 mg/l Fluorid, und hat eine Temperatur von 27° C. Der Natriumgehalt von 25 mg/l und der Chloridgehalt von 48 mg/l sind im Vergleich zum Mineralwasser Lostorf 2 gering. Das aus Bohrung 4 gepumpte Mineralwasser Lostorf 3 wird im neuen Bad für die Schwefelbäder benutzt.

Das Wasser stammt aus dem Oberen Muschelkalk, der mit der Dottenberg-Aufschiebung unter mächtigen undurchlässigen Deckschichten von Süden auftaucht (Fig. 2), also aus einer Richtung, in welcher bis zum Rand des Aarmassivs keine dem Oberen Muschelkalk entsprechenden Schichten mehr zu Tage treten (Fig. 3). Wir haben die gleiche geologische Situation wie bei allen Schwefelquellen des Faltenjuras: Baden, Schinznach-Bad, Bad Lostorf (wo die höchsten Schwefelgehalte auftreten), Schwefelwässer je im südlichen Teil des Hauensteinbasis- und des Belchentunnels. Immer handelt es sich um den Oberen Muschelkalk im aufgeschobenen und gegen das Molassebecken (Mittelland) abfallenden Südschenkel der südlichsten Jura-falte mit bis zur heutigen Erdoberfläche hochgepreßter Trias. Außer in dieser geologischen Situation gibt es im Muschelkalk des Faltenjuras keine Schwefelquellen. Das Wasser des unteren Stockwerks von Bad Lostorf (Mineralwasser 4) hat z.B. keinen Schwefelwasserstoff, obwohl das zu dessen Entstehung notwendige sauerstofflose Milieu ebenfalls gegeben wäre. Die sehr hohen Schwefelwasserstoffgehalte der beiden Schwefelwässer (Mineralwasser 2 und 3) von Bad Lostorf sind kaum anders zu erklären, als in Zusammenhang mit Erdöl- oder Erdgasvorkommen, die allerdings nicht bedeutend sein müssen. Öl- und Gasspuren sind aber im Oberen Muschelkalk aller im Molassebecken bisher abgeteuften Erdölbohrungen angetroffen worden, zusammen mit schwefelwasserstoffhaltigen Wässern auch im Belchentunnel.

Die Temperaturen der schwefelwasserstoffhaltigen Thermen von Baden, Schinznach und des oberen Stockwerks von Lostorf (Mineralwasser 3) schließlich lassen sich nur durch einen Aufstieg des Wassers aus Tiefen erklären, welche der das Wasser leitende Obere Muschelkalk erst südlich der Fassungen hat. Nach den Temperatur-Messungen im Hauenstein-Basis-tunnel und nach der Wassertemperatur im unteren Stockwerk (Mineralwas-ser 4) von Bad Lostorf beträgt die geothermische Tiefenstufe hier etwa 28,5 m/ $^{\circ}$ C (1° C Zunahme der Gesteinstemperatur bei einer Zunahme der Tiefe um 28,5 m). Dies ergäbe im Mittel des oberen Stockwerks von Bad Lostorf eine Gebirgstemperatur von $17,5^{\circ}$ C. Die Temperatur des Wassers in der Tiefe beträgt tatsächlich mindestens 28° C (beim Aufstieg im Bohrloch kühlt es sich auf 27° C ab), ist somit mindestens $9,5^{\circ}$ C höher. Das Was-
ser muß also aus einer Tiefe von gegen 600 m aufsteigen. Dies ist etwas weniger als die Tiefe, welche der Obere Muschelkalk im Süden unter der Mulde zwischen der Engelberg-Born-Falte und der Dottenberg-Aufschiebung tatsächlich hat (Fig. 3).

Aus allem ergibt sich, daß ein Zufluß aus Richtung Molassebecken (Mit-telland) und, noch weiter gesehen, wahrscheinlich aus Richtung Alpen ange-nommen werden muß (Fig. 3). Wie aus Angaben über Erdölbohrungen her-vorgeht, hat der Obere Muschelkalk unter der mittelländischen Molasse noch eine genügende Durchlässigkeit, um Wasser leiten zu können. Für den Abschnitt unter den mächtigen alpinen Deckenpaketen (Fig. 3) kann nach Ergebnissen von Bohrungen am österreichischen und süddeutschen Alpen-rand angenommen werden, daß der ursprüngliche Porenraum der Gesteins-schichten besser erhalten ist als in den überschobenen Decken. Trotz der großen Tiefen kann die Verbindung von den wasserdurchlässigen Schichten am Nordrand des Aarmassivs zum Oberen Muschelkalk des Jurasüdrands demnach offen sein, möglicherweise auf wasserwegsamen Zonen, die schon vor der Alpen- und Jurafaltung und der Ablagerung der Molasse bestanden hatten.

Tritium, ein Wasserstoff-Isotop, dessen Gehalt 1972 wie der des Sauer-stoff-Isotops 18 im Physikalischen Institut der Universität Bern bestimmt wurde, ist nur in geringen Mengen vorhanden, was besagt, daß das unter-suchte Mineralwasser Lostorf 3 vor 1954, als mit der Explosion der ersten Wasserstoffbomben erstmals große Tritium-Mengen freigesetzt wurden, in den Boden gelangt war, also vor seiner Fassung mehr als 18 Jahre unter-irdisch geflossen ist. Dies bestätigt den hervorragenden Schutz des Wassers gegen Verunreinigungen.

Im Mineralwasser Lostorf 3 sind Calcium-, Magnesium-, Sulfat- und Hydrogenkarbonat-Ionen die wichtigsten gelösten Bestandteile. Dieser Mi-neralgehalt resultiert wie im Mineralwasser Lostorf 4 aus einfachen Lösungs-vorgängen in den das Wasser zur Hauptsache leitenden und den diese über- und unterlagernden Schichten sowie aus komplizierten chemischen Gleich-gewichtssystemen. Der Schwefelwasserstoff, welcher das Wasser neben der

Mineralisation und der Thermalität charakterisiert, kann nur durch eine mikrobielle Reduktion von gelösten Sulfaten entstehen, was ein sauerstoffloses Milieu und das Vorhandensein von organischen Substanzen voraussetzt, welche, wie erwähnt, als Erdöl oder Erdgas im Oberen Muschelkalk des wahrscheinlich durchflossenen Gebietes nachgewiesen sind.

Eine Herkunft vom Nordrand des Aarmassivs ist auch für den aus der Tiefe aufsteigenden Anteil des Mineralwassers Lostorf 2 anzunehmen. Da beide Wässer einen hohen Schwefelwasserstoffgehalt, aber sonst einen sehr verschiedenen chemischen Charakter haben und die Schüttung des Mineralwassers 2 in keiner Weise durch die Entnahme des Mineralwassers 3 beeinflußt wird, muß angenommen werden, daß der Zufluß von Süden in Kluft- oder Karstsystemen erfolgt, die ganz oder weitgehend voneinander getrennt sind. Das Mineralwasser 2 hat dabei wesentlich stärker als das Mineralwasser Lostorf 3 eine Verbindung mit den im Untergrund des Mittellandes, vielleicht bis in die Nähe von Bad Lostorf, noch intakten Steinsalzlagen, was seinen hohen Kochsalzgehalt erklärt.

Mineralwasser Lostorf 4

Die Bohrung 3 ist als einzige unter das obere Mineralwasserstockwerk abgeteuft worden. Sie stieß unter undurchlässigem Keuper in 528 m auf den erwarteten Oberen Muschelkalk des Leutschenberg-Südschenkels (Fig. 2). Als eine Tiefe von 580,4 m erreicht war, kam es zu einem spontanen artesischen Auslauf von schätzungsweise 3000 l/min Wasser, das etwa 27°C warm war und, wie gewünscht, keinen Schwefelwasserstoff enthielt (Mineralwasser 4). Zum Glück hatten wir wegen der nicht ganz auszuschließenden Gefahr eines Erdgasausbruchs einen sogenannten Preventer installieren lassen, mit dem dann der Arteser nach seinem Ausbruch unter Kontrolle gehalten werden konnte.

Spätere Messungen der Wassergeschwindigkeiten im Bohrloch (Flow Meter Tests) durch die Firma Schlumberger ergaben, daß etwa 80 % des Wassers zwischen 571 und 578 m dem Bohrloch zufließen und Teufen unter 578 m noch etwa 20 % des Zuflusses liefern. Der Arteser war aber bei 580,4 m ausgebrochen. Ein artesischer Aufstieg war zwischen 571 und 580,4 m offensichtlich zunächst noch durch das zum Bohren benutzte, mit beschwerenden Mineralien versehene Wasser, die sogenannte Bohrspülung, verhindert worden. Der artesische Ausbruch war demnach im labilen Gleichgewicht zwischen dem Druck der Bohrspülungssäule und dem Druck des Thermalwassers nur zufälligerweise gerade bei 580,4 m aufgetreten.

Die Ergebnisse der Flow Meter Tests zwingen zum Schluß, daß der Thermalwasserzufluß praktisch ausschließlich in einer nur 7–13 m hohen Zone erfolgt, die stark zerklüftet sein muß und wahrscheinlich auch vom Wasser durch Kalklösung erweiterte Hohlräume enthält, d.h. verkarstet ist.

Der darüber auf einer Strecke von 43 m durchbohrte obere Teil des Oberen Muschelkalks liefert hier kaum Wasser.

In dem sich nach dem artesischen Ausbruch auch bei der Bohrarbeit als stark zerklüftet zu erkennen gebenden Gebirge gelang es noch, die Bohrung bis 584 m vorzutreiben. Ohne die Möglichkeit zu einer definitiven Fassung des Wassers 4 in der Bohrung 3 zu gefährden, war nicht mehr daran zu denken, in größere Teufen vorzustoßen, um allfällige noch tiefere Mineralwasserstockwerke zu prüfen. Die Bohrung 3 hat zwar den Bau des Faltenjuras rund 370 m tiefer als der mit dem Hauenstein-Basistunnel bisher tiefste Aufschluß aufgeklärt (Fig. 2). Die Fläche, auf welcher der Faltenjura in der Steinsalzzone des Mittleren Muschelkalks vom tieferen Sockel abgesichert und dann über den Tafeljura geschoben wurde, ist aber mit der 35 m unter den Meeresspiegel gehenden Bohrung noch nicht erreicht worden (Fig. 2). Was hier unter der Abscherungsfläche liegt, noch der nach Süden untertauchende Tafeljura mit seiner ganzen Schichtenfolge vom Tertiär (Miocän) bis hinab zu den Graniten und Gneisen oder aber wie im Mittelland nur die normal unter dem Mittleren Muschelkalk folgenden Schichten, muß vorläufig Hypothese bleiben. Mit beiden Annahmen sind in der Tiefe weitere Mineralwasserstockwerke möglich. Da es aber galt, mit den verfügbaren Mitteln zunächst die Nutzung der nachgewiesenen Mineral- und Thermalwässer sicherzustellen, mußten Versuche, in größeren Tiefen noch wärmere und chemisch wiederum andersartige Wässer zu erschließen, vorläufig zurückgestellt werden.

Unter der ab Gelände bis 530 m teleskopartig mit sechs Stahlrohrtouren gesicherten Bohrlochstrecke wurden zur definitiven Fassung des Wassers bis 582,8 m Filterrohre eingesetzt.

Die möglichen Entnahmen aus dem durch Bohrung 3 erschlossenen unteren Stockwerk wurden mit zahlreichen Auslauf- und Pumpversuchen getestet. Kurzfristig können bei 1,8 at Überdruck 3000–6000 l/min Wasser frei am Bohrlochkopf auslaufen. Bei längerem Betrieb mit vollem Auslauf kommt es jedoch zu einem Druckabfall, wodurch die ohne Pumpen nutzbare Wassermenge geringer wird. Ohne Pumpen konnten die größten Wassermengen mit einem halbtägig intermittierenden Auslaufbetrieb gewonnen werden. Bei diesem Betrieb bauen sich während der Unterbrüche wieder höhere Drücke auf. Die so im 24-Stunden-Mittel nutzbare Wassermenge beträgt mindestens etwa 440 l/min. Mit einer Saugpumpe, welche die 584 m hohe Wassersäule nur bis 6,75 m abzusenken gestattete, ließen sich aber während 5½ Tagen bereits durchschnittlich 700 l/min Wasser fördern. Mit stärkeren Absenkungen wären zweifellos noch weit größere Entnahmen möglich. Der gegenwärtige Bedarf des Bades beträgt jedoch höchstens 250 l/min. Er konnte während den nun 3½ Jahren Betrieb immer mühelos mit dem gedrosselten freien artesischen Auslauf gedeckt werden. Eine Pumpe muß nur für den Fall bereitstehen, wenn die natürliche Druckhöhe einmal in die Nähe des Bohrlochkopf-Niveaus abfallen sollte.

Nach der Analyse von Prof. Dr. O. HÖGL und Dr. H. SENFTEN und nach zahlreichen Kontrolluntersuchungen, die nur geringe Schwankungen von Temperatur und Mineralisation ergaben, ist das Mineralwasser Lostorf 4 wesentlich schwächer mineralisiert als das Wasser Lostorf 3. Die vollständige Analyse zeigte einen Gesamtmineralgehalt von 906 mg/l, der für sich allein das Wasser nicht als Mineralwasser zu klassifizieren erlaubte. Nach den Bestimmungen der schweizerischen Lebensmittelverordnung ist es aber als *Therme* und als *Fluorwasser* ein Mineralwasser.

Unter den gelösten Mineralbestandteilen überwiegen Calcium und Sulfat; daneben gehören Magnesium und Hydrogenkarbonat zu den Hauptbestandteilen. Diese Bestandteile stammen aus Gips (Calcium-Sulfat), aus Kalk (Calcium-Karbonat) und aus Dolomit (Calcium-Magnesium-Karbonat), eventuell auch aus dem Gips beigemischten Bittersalz (Magnesium-Sulfat).

Kalke und Dolomite, welche die das Wasser leitende Schichtenfolge aufbauen, werden durch die vom Wasser aus der Atmosphäre und vor allem beim Versickern aus der Bodenluft aufgenommene Kohlensäure gelöst. Gips, der im Wasser leicht löslich ist, kommt sowohl im Keuper über als auch im Mittleren Muschelkalk unter den Schichten des Oberen Muschelkalks vor, aus welchen das Wasser der Bohrung zuströmt (Fig. 2). Das Wasser zirkulierte somit auf seinem Lauf zwischen Versickerung und Fassung nicht nur in den Kalken und Dolomiten, sondern zum Teil auch auf Klüften oder Lösungshohlräumen gipsführender Schichten. Aus seiner chemischen Beschaffenheit geht jedoch hervor, daß nicht nur einfache Lösungsvorgänge, sondern auch komplizierte chemische Gleichgewichtssysteme zur schliesslich resultierenden Mineralisation führen.

Bei seinem Austritt am Bohrlochkopf enthält das Wasser in Form feiner Bläschen freies Quellgas, etwa 4 cm³ im Liter. Es handelt sich ausschließlich um Stickstoffgas, das sicher atmosphärischer Herkunft ist, d. h., das von den Niederschlägen vor ihrer Versickerung aus der Atmosphäre gelöst wurde, und das zum Teil auch aus Nitraten, die im Thermalwasser nicht mehr nachweisbar sind, durch die sogenannte Denitrifikation, entstand. Die spontane Entgasung ist damit zu erklären, daß die Grenze der möglichen Lösung von Stickstoffgas in Wasser wegen der gegenüber dem Einzugsgebiet höheren Temperatur und dem gegenüber der Tiefe geringeren Druck überschritten ist.

Das im unteren Stockwerk erbohrte Mineralwasser 4 stammt aus einer hydrogeologischen Struktur (Fig. 2), deren Grenzen definierbar sind. Der mit Bohrung 3 ab 528 m Tiefe erschlossene Obere Muschelkalk des Leutschenberg-Südschenkels tritt 2 km nördlich zu Tage (Fig. 2). Er kommt oberflächlich auf rund 10 km in einer zusammenhängenden, meistens 100 bis 200 m breiten Zone vor, in welcher das Wasservorkommen durch Versickerungen gespeist wird. Die oberhalb der Zone des Oberen Muschelkalks (Fig. 21) über undurchlässigen oder schlecht durchlässigen Felsschichten gelegenen Hänge bilden zudem indirekte Einzugsgebiete (Fig. 21).

Ursprünglich muß der natürliche Überlauf des Vorkommens nördlich Bad Lostorf jenseits des Jurakamms auf etwa 625–670 m ü.M. gelegen haben (Fig. 21). Seit dem Durchstoß des Hauenstein-Basistunnels läuft aber Wasser westlich Bad Lostorf auf etwa 425 m ü.M. in die Tunnelröhre aus. Dort werden etwa 900 l/min thermales Wasser abgeleitet. Trotzdem liegt die Druckhöhe bei Bohrung 3 noch rund 140 m höher als der Ausfluß 2 km westlich im Tunnel.

Die Tritium-Bestimmungen zeigen, daß die wasserleitenden Schichten zumindest im Süden, wo sie mit der Bohrung 3 erschlossen sind, nur langsam durchströmt werden. Auch dieses Wasser hat wie das Mineralwasser Lostorf 3 eine unterirdische Fließzeit von über 18 Jahren hinter sich, bevor es gefaßt ist.

Die beim Zutritt des Wassers in das Bohrloch 27,8°C betragende Temperatur entspricht der in jener Tiefe zu erwartenden Gebirgstemperatur. Im Gegensatz zum Mineralwasser Lostorf 3 hat das Mineralwasser Lostorf 4 keine größere Teufe als die seiner Fassung durchflossen.

Mit den anderen drei Mineralwässern von Bad Lostorf hat das Mineralwasser 4 keinen Zusammenhang. Die Ergiebigkeit jener Wässer wird deshalb durch Entnahmen des Mineralwassers Lostorf 4 nicht beeinflußt.

Das Mineralwasser Lostorf 4 wird für das Thermalschwimmbecken des neuen Bades und andere Hydrotherapien genutzt. Das Wasser wäre aber nach der Zusammensetzung und dem konstanten Gehalt der in ihm gelösten Mineralbestandteile auch zur Nutzung als Mineral-Tafelwasser geeignet, wobei der durch die mehr als 500 m mächtigen Deckschichten gewährte Schutz und die mehr als 18 Jahre betragende unterirdische Fließzeit hygienisch besonders beachtenswert wären.

I. Vorgeschichte und Bohrungen 1969–1973

(Tabellen 1 und 2)

1.1 Alte Mineralwasserfassungen von Bad Lostorf

(Mineralwässer 1 und 2)

In Lostorf hatte man spätestens seit 1412 eine beim heutigen Bad gefäßte Gipsquelle als Heilwasser benutzt (Mineralwasser Lostorf 1).

Ende der zwanziger Jahre des 19. Jahrhunderts war 210 m östlich dieser ältesten Fassung ein subthermales kochsalzhaltiges Schwefelwasser entdeckt worden (Mineralwasser Lostorf 2). Im sogenannten «Schwefelloch», einem oberflächlich abflußlosen Geländetrichter mit einem Durchmesser von etwa 40 m, welchen HARTMANN (1917) als künstlich ausgehoben betrachtete, der aber schon als eine durch Lösungen des Quellwassers entstandene Doline angelegt sein konnte, wurden wiederholt Neufassungen des Schwefelwassers vorgenommen. Im Winter 1864/65 wurde eine stärkere Quelle in einem 8 m tiefen Schacht, eine schwächere in einem flacheren Schacht gefäßt, der in einem etwa 20 m nordöstlich der Bohrung 1 (1969; vgl. Ziff. 1.2) unter der Böschung des Geländetrichters heute noch bestehenden gemauerten Stollen zugänglich war. Nach der Überlieferung (HARTMANN 1917) nutzte man das Wasser mit einer etwa 6–7 l/min leistenden Pumpe, um es in der neben dem größeren Schacht erstellten Trinkhalle für die Kuren zu verwenden. P. BOLEY analysierte die stärkere Quelle im Frühjahr 1865. Die nächste Neufassung war wiederum ein Schacht, der im Mai 1912 niedergebracht wurde und nach unseren Bohrbefunden von 1969 (Bohrung 1) 11,5 m tief war. HARTMANN, welcher damals die Arbeiten leitete und das Wasser analysierte, berichtet, daß die neue Fassung 10 l/min lieferte.

1.2 Neufassung 1969 der Schwefel-Natrium-Chlorid-Subtherme

(Bohrung 1, Mineralwasser 2)

Da die Fassung von 1912 im Laufe der Zeit teilweise zerfallen war, ließ die Bad Lostorf AG im Hinblick auf den Neubau des Bades das Schwefelwasser (Mineralwasser 2) 1969 durch eine im Schacht von 1912 bis 25 m abgeteufte Brunnenbohrung ø 520 mm neu fassen. Auf den Versuch, das Wasser in einer tieferen Bohrung zu gewinnen, mußte damals verzichtet werden. Die aus der Bohrung ausgeführten Pumpversuche ergaben, daß der Zufluß an eigentlichem Mineralwasser nicht größer als die schon früher genutzten etwa 10 l/min war und daß sich aus den erbohrten Felsschichten bei größeren Entnahmen zunehmend schwächer mineralisiertes Grundwasser beimischte.

1.3 Sondierbohrung 1971 und Erschließung der neuen Schwefel-Calcium-Sulfat-Therme (Bohrung 2, Mineralwasser 3a)

Für das neue Bad waren die zwei bisher bekannten Wässer unbefriedigend, weil ihr Mineralgehalt je nach Entnahmemenge (Mineralwasser 2) oder Wittring (Mineralwasser 1) stark schwankt, das eine Wasser (Mineralwasser 2) daher bei hohem Mineral- und Schwefelgehalt nur eine verhältnismäßig geringe Ergiebigkeit hat, und weil die Temperaturen beider Wässer weit unter dem für Thermen festgelegten Grenzwert von 20° C liegen.

Die Bad Lostorf AG unterbreitete uns deshalb die Frage, ob allenfalls durch eine Bohrung ein Mineralwasser erschlossen werden könnte, das den Bedürfnissen des projektierten neuen Bades wesentlich besser als die beiden bekannten Wässer entspräche. Unsere geologischen Voruntersuchungen ergaben, daß mit einer gezielt angesetzten Bohrung verhältnismäßig gute Aussichten bestanden, ein oder mehrere solcher Wässer zu erschließen. Die Bad Lostorf AG entschloß sich deshalb 1971 dazu, die Bohrung 2 ausführen zu lassen. Diese stieß in 259,5 m Tiefe auf den Aquifer¹ des Oberen Muschelkalks, welcher in seinem oberen Teil, dem Trigonodusdolomit, noch bis 280,0 m durchfahren wurde. Die Pumpversuche ergaben, daß aus dem erschlossenen Aquifer mindestens 1,5 l/s = 90 l/min eines calciumsulfathaltigen Mineralwassers mit einem Schwefelwasserstoff-Gehalt von etwa 30 mg/l und einer Temperatur von 27° C (Mineralwasser Lostorf 3a) genutzt werden konnten.

1.4 Bohrung 1972 und Erschließung der neuen schwefelfreien Therme (Bohrung 3, Mineralwässer 3b und 4)

Das Ergebnis der Bohrung 2 war zwar balneologisch sehr befriedigend. Für das im Projekt des neuen Bades vorgesehene Schwimmbad war es jedoch erwünscht, zusätzlich ein keinen Schwefelwasserstoff enthaltendes Wasser mit einer noch größeren Ergiebigkeit und möglichst auch mit einer noch höheren Temperatur zur Verfügung zu haben. Da wir in größerer Tiefe weitere Aquifers erwarteten, die Sondierbohrung (Bohrung 2) sich aber nicht weiter vertiefen ließ, beschloß die Bad Lostorf AG eine Bohrung anzusetzen, die bis auf mehr als 1000 m hätte abgeteuft werden können (Bohrung 3). Diese Bohrung durchfuhr im Jahre 1972 von 247 bis 346 m den mit Bohrung 2 bereits angeschürften Aquifer des Oberen Muschelkalks vollständig. Aus diesem konnten 10 l/s = 600 l/min des calciumsulfat- und schwefelwasserstoffhaltigen und 27° C temperierten Mineralwassers gepumpt werden (Mineralwasser 3b).

¹ Durchlässige Gesteinsschicht, welche Grundwasser enthält und weiterleitet (zum Grundwasser gehören die Mineralwässer und Thermen).

Für die Vertiefung der Bohrung mußte der bis dahin durchfahrene Aquifer abgeschlossen werden. Die Bohrung traf als nächsttieferen Aquifer ab 528 m, wie erwartet, in einer anderen tektonischen Einheit wiederum Oberen Muschelkalk an. Bei einer Bohrtiefe von 580,4 m verdrängte das zufließende Wasser die Spülung, so daß es am Bohrlochkopf zum spontanen Ausfluß von etwa 60 l/s = 3000 l/min Wasser kam. Ähnlich dem Wasser des höheren Aquifers war es etwa 27° C temperiert, enthielt aber, wie gewünscht, bei verhältnismäßig großer Schüttung keinen Schwefelwasserstoff (Mineralwasser 4). Da man dieses für das neue Bad wertvolle Wasser verständlicherweise

Tabelle 1
Ausführung der Arbeiten

Bauherrschaft	Bad Lostorf AG (seit 1973 Thermalbad Lostorf AG)
Geologisch-hydrologische Leitung der Arbeiten	Büro Dr. H. SCHMASSMANN, Liestal
Gesamtleitung, Beratung, Bericht	Dr. H. SCHMASSMANN
Örtliche Versuchsleitung, Bohrprofil-Aufnahmen	Dr. A. TERZIDIS
Bohrungen, Pump- und Auslaufversuche ..	Fehlmann Grundwasserbauten AG, Bern
Bauführung	Ing. ST. MARCIUS
Bohrmeister	J. GASPIC
Lage- und Koten-Vermessung	Büro RAHM und BUXTORF, Olten
Geophysikalische Bohrlochmessungen	DURET und REBER, Basel, und Schlumberger-Verfahren, Biberach BRD
Laufende chemische und bakteriologische Untersuchungen von Wasserproben	Lebensmittelinspektorat Baselland, Liestal
Eingehende chemische Mineralwasseruntersuchungen	Prof. Dr. O. HöGL und Dr. H. SENFTEN, Bern
Isotopen-Untersuchungen	Physikalisches Institut der Universität Bern
Gas-Untersuchungen	Institut für anorganische Chemie der Universität Basel
Die administrative Leitung der Arbeiten wurde durch die Bad Lostorf AG veranlaßt, deren Personal auch einige Auslaufversuche überwachte und außerhalb der Zeiten dieser Versuche weitere Messungen vornahm.	

in der nun ausgeführten Bohrung (Bohrung 3) definitiv fassen wollte, war bohrtechnisch nicht mehr daran zu denken, die Bohrung noch wesentlich zu vertiefen, um weitere Aquifers zu prüfen. Die Bohrung wurde im stark zerklüfteten Gebirge noch bis 584 m vorgetrieben und dann als definitiver Brunnen zur Nutzung der artesisch austretenden Therme (Mineralwasser 4) ausgebaut.

1.5 Definitive Fassung 1973 der neuen Schwefel-Gips-Therme (Bohrung 4, Mineralwasser 3c)

Für das neue Bad stellte sich als vorläufig letzte Aufgabe, das schwefelwasserstoffhaltige Wasser des oberen Aquifers definitiv zu fassen. Die Sondierbohrung (Bohrung 2), deren Rohre im Bereich des Gipskeupers (vgl. Ziff. 3.26) zusammengedrückt worden waren, bot dazu keine ausreichende Sicherheit. Für die definitive Fassung des schwefelwasserstoffhaltigen Wassers ließ die Bad Lostorf AG 1973 eine weitere Bohrung (Bohrung 4) wiederum, wie die Sondierbohrung (Bohrung 2), im Trigonodusdolomit (vgl. Ziff. 3.24), bis auf 280 m abteufen. Von dem dabei erschlossenen Wasser (Mineralwasser 3c) konnten über $2,7 \text{ l/s} = 165 \text{ l/min}$ gepumpt werden.

Tabelle 2
Situation der Fassungen

Mineralwasser Lostorf	Fassung	Landeskoordinaten	Kote Bohransatzpunkt
1	Quellfassung	637521 /249306	-
2	Bohrung 1	637729.395/249324.272	486.67
3a	Bohrung 2	637330.094/249233.942	548.87
3b	Bohrung 3*	637326.505/249241.592	549.23
3c	Bohrung 4	637322.114/249234.833	549.19
4	Bohrung 3	637326.505/249241.592	549.23

* Zeitweilige Fassung während des Abteufens der Bohrung, heute abgeschlossen.

2. Tektonik (Gebirgsbau)

(vgl. Fig. 1-4)

2.1 Allgemeines

Das Gebiet von Bad Lostorf gehört zum Faltenjura. Folgende Schichtgruppen (vgl. Ziff. 3) sind von der Jurafaltung erfaßt worden:

Tertiär:

Jura	{	Malm
		Dogger
		Lias
Trias	{	Keuper
		Muschelkalk {
		Oberer Muschelkalk {
		Trigonodusdolomit
		Plattenkalke
		Trochitenkalke
		Mittlerer Muschelkalk {
		Dolomitzone
		Obere Sulfatzone

Auf die weitere Gliederung eines Teils dieser Schichtgruppen kommen wir bei der Besprechung der Stratigraphie zurück. Das Steinsalzlager, welches in der normalen Schichtenfolge unter der Oberen Sulfatzone des Mittleren Muschelkalks liegt, bildete den Gleithorizont, über welchem die jüngeren Schichten zum Faltenjura zusammengepreßt wurden.

In Querprofilen durch den Faltenjura bei Bad Lostorf können wir von Norden nach Süden folgende Strukturen unterscheiden (Fig. 1):

- Schuppenzone
- Geißflue-Wasserflue-Synklinale²
- Leutschenberg-Antiklinale³
- Burgflue-Synklinale und Altenbrunnen-Synklinale
- Hauenstein-Antiklinale
- Aaretal-Synklinale
- Born-Engelberg-Antiklinale

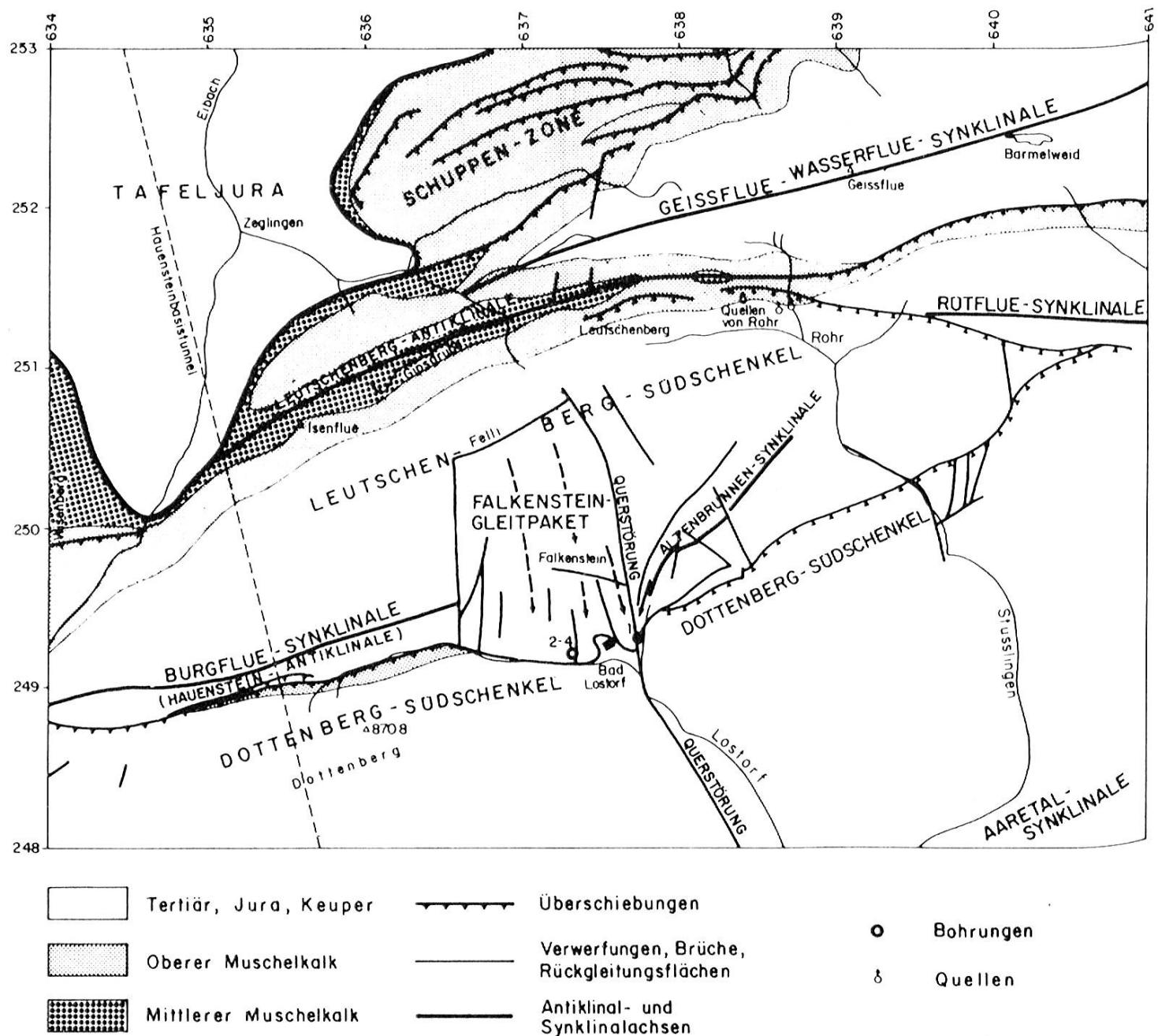
Die auf den Tafeljura überschobenen Schuppen aus Muschelkalkschichten bilden östlich Zeglingen den Nordrand des Faltenjuras. Südlich dieser

² Mulde, nach unten gerichteter Teil einer Falte.

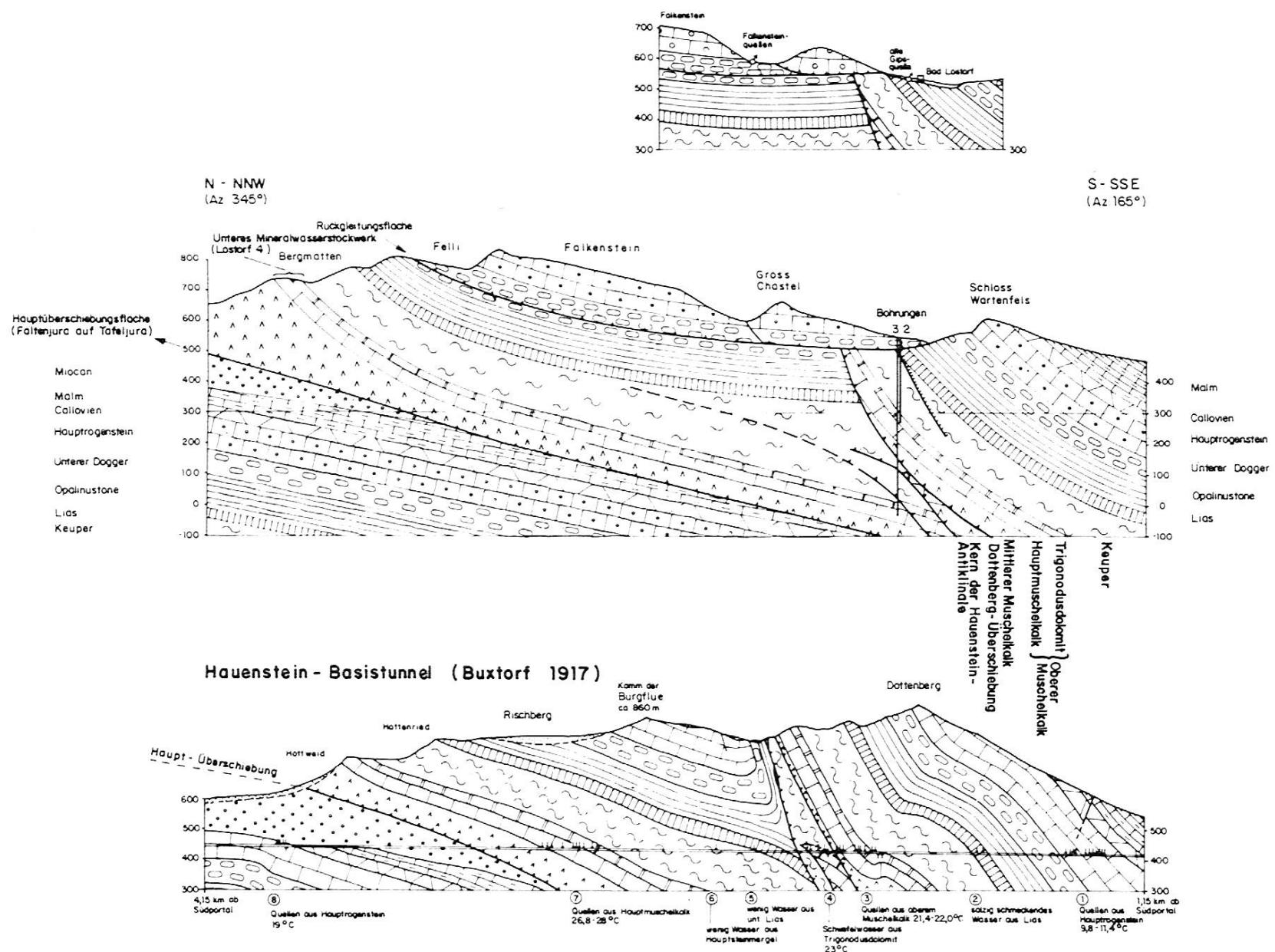
³ Gewölbe, Sattel einer Falte.

Figur 1

Tektonische Übersichtskarte der Umgebung von Bad Lostorf
nach Karten von F. MÜHLBERG (1907, 1914), H. U. BARTHOLET (1964) und
F. GSELL (1968) und eigenen Untersuchungen



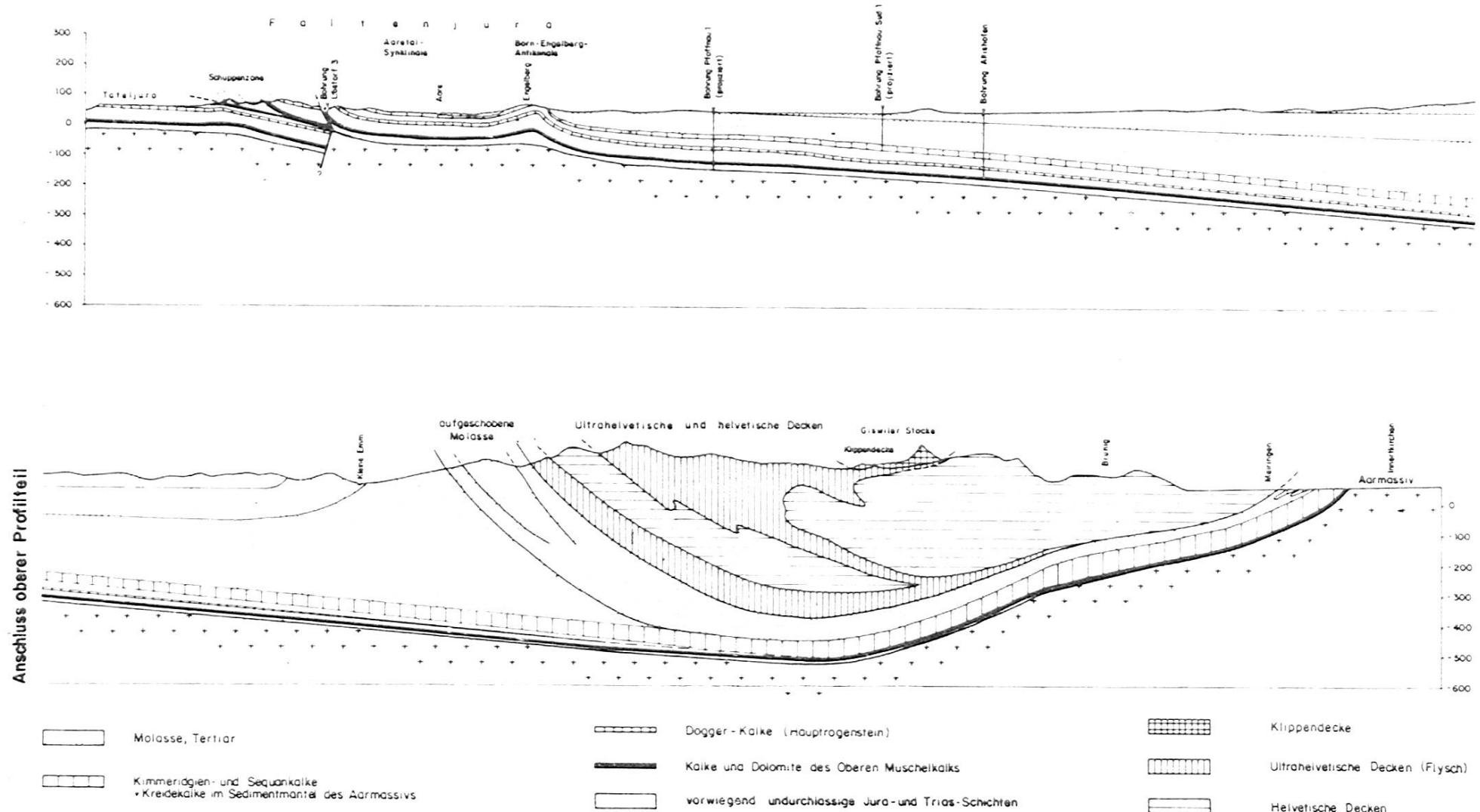
Figur 2
Geologische Profile durch den Faltenjura bei Bad Lostorf



Figur 3

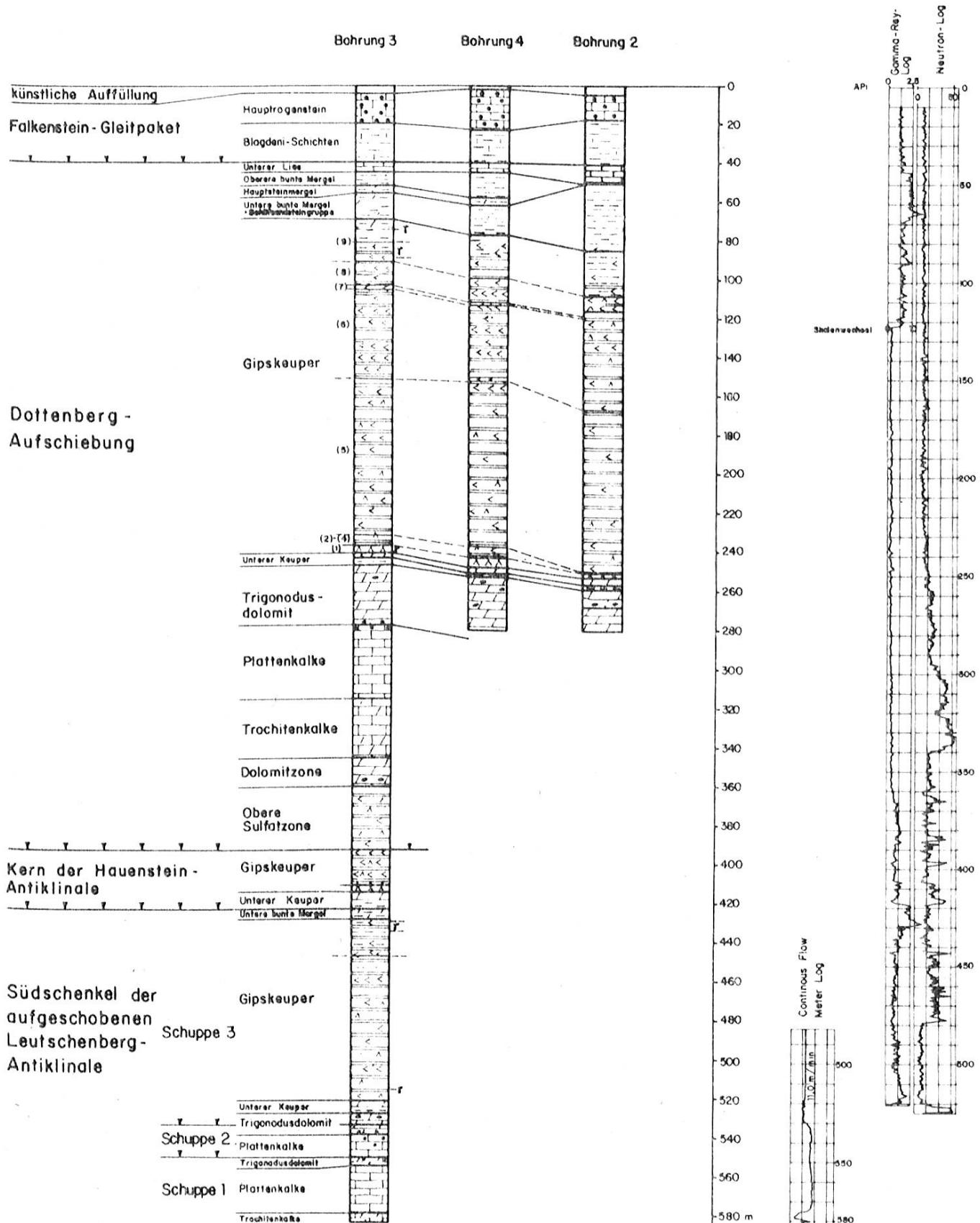
Geologisches Profil vom Tafeljura über Bad Lostorf zum Nordrand des Aarmassivs

Benützte Literatur: BUXTORF 1951, BÜCHI et al. 1965, FISCHER und LUTERBACHR 1963, KOPP 1952, 1955,
LAUBSCHER 1965, LEMCKE et al. 1968, SPICHER 1972, Schweiz. Alpenposten 1951.



Figur 4

Tektonische und stratigraphische Korrelation der Bohrungen 2, 3 und 4, 1 : 4000



Schuppenzone sind die Muschelkalkschichten hier zu einer Mulde, dem westlichen Ausläufer der Geißflue-Wasserflue-Synklinale gefaltet, welche weiter östlich, an der Geißflue und an der Wasserflue, Schichten bis hinaus zum Dogger und Malm einschließt. Im Süden folgt ein Gewölbe, die Leutschenberg-Antiklinale. In ihrem Kern tritt der Mittlere Muschelkalk zutage, dessen Gipslager bei Zeglingen in einer großen Grube abgebaut werden.

2.2 *Leutschenberg-Südschenkel*

Vom Gewölbescheitel aus fallen die Schichten gegen Süden ab. Erst von da an ist die Struktur im Hinblick auf die Entstehung der Lostorfer Mineralwässer von Interesse (Fig. 2). Im Profil des Hauenstein-Basistunnels (Fig. 2) bilden die ausstreichenden Schichtköpfe dieses Leutschenberg-Südschenkels den Nordrand des auf den Tafeljura überschobenen Faltenjuras; die nördlicheren Faltenjura-Strukturen sind hier der Erosion zum Opfer gefallen.

Im Leutschenberg-Südschenkel spalten sich nach Osten am Leutschenberg eine Überschiebung und östlich Rohr eine Synklinale (Rütflue-Synklinale) ab (Fig. 1). Nördlich davon überfährt der Südschenkel des Leutschenberg-Gewölbes mit einer weiteren Überschiebung dessen Kern und den Nordschenkel (Fig. 1). Trotz dieser tektonischen Komplikationen tritt der vom Leutschenberg-Gewölbe gegen Süden abtauchende Obere Muschelkalk in einer zusammenhängenden und für die Entstehung des in Bohrung 3 erschlossenen Mineralwassers 4 bedeutsamen Zone (Fig. 1) zutage, die vom Südhang des Wisenbergs über die Isenflue (südlich Zeglingen), über den Leutschenberg, nördlich Rohr und weiter östlich über das ehemalige Lorenzenbad (südlich Obererlinsbach) hinaus auf eine Länge von rund 10 km durchzieht.

Südlich der Zone des oberflächlich aufgeschlossenen Muschelkalks entstand im Südschenkel des Leutschenberg-Gewölbes westlich von Bad Lostorf eine weitere Mulde, die Burgflue-Synklinale (Fig. 1), jedoch, wie das Profil des Hauenstein-Basistunnels (Fig. 2) zeigt, nur in den Schichten des Doggers und Malms. Im Lias, Keuper und Muschelkalk setzt sich der Leutschenberg-Südschenkel unter der Burgflue-Synklinale fort. Nördlich der Bohrungen von Bad Lostorf ist auch der Dogger nicht zur Burgflue-Synklinale gefaltet, und der Malm ist nicht mehr erhalten. In der hier kontinuierlich südfallenden Schichtplatte (Fig. 2) sind die höheren Dogger-Schichten als Falkenstein-Gleitpaket nach Süden zurückgeglitten (vgl. Ziff. 2.7). Erst östlich Bad Lostorf spaltet sich im Dogger und Malm des Leutschenberg-Südschenkels wieder eine Synklinale (Altenbrunnen-Synklinale) ab (Fig. 1).

Bei den Erörterungen über die Entstehung der Lostorfer Mineralwässer können die beiden offenbar nur höhere Schichten erfassenden Synklinal-Strukturen außer Betracht gelassen werden. In dem für die Entstehung des Mineralwassers Lostorf 4 maßgebenden Muschelkalk taucht der Leutschen-

berg-Südschenkel von seinen oberflächlichen Aufschlüssen bis zur Aufschiebung der Hauenstein-Antiklinale kontinuierlich nach Süden unter (Fig. 2). So bildet östlich der Gipsgruppen von Zeglingen der Hauptmuschelkalk noch den sich auf 924 m ü. M. erhebenden Leutschenberg, währenddem er 2,1 km südlich mit Bohrung 3 erst ab 522 m Tiefe oder 27 m ü. M., also rund 900 m tiefer angetroffen worden ist.

2.3 Schuppen des Leutschenberg-Südschenkels in Bohrung 3

Im Profil der Bohrung 3 (Fig. 4) zeigen einerseits Mächtigkeitsreduktionen und andererseits eine Repetition von Schichten eine Verschuppung des Leutschenberg-Südschenkels (Fig. 2), die den Zusammenhang der generell südfallenden durchlässigen Serie des Oberen Muschelkalks indessen nicht unterbricht. Die einzelnen, im stratigraphischen Teil noch näher zu beschreibenden Schichtgruppen wurden ab 429 m Tiefe auf folgenden, mit den Normalmächtigkeiten verglichenen Bohrlängen angetroffen:

Tabelle 3
Bohrung 3 | Schuppenfolge ab 429 m

		Bohränge	Normalmächtigkeit
Schuppe 3	Gipskeuper	93 m	97 m
	Unterer Keuper	6 m	3 m
	Trigonodusdolomit	6 m	18 m
Schuppe 2	Trigonodusdolomit	5 m	18 m
	Plattenkalke	12 m	22 m
Schuppe 1	Trigonodusdolomit	4 m	18 m
	Platten- und Trochitenkalke	29 m erbohrt	39 m

Zwischen den Schuppen 1 und 2 fehlen mindestens, d.h. bei Annahme horizontaler Schichtlagerung, 14 m Trigonodusdolomit und 10 m Plattenkalke. Die Schuppe 2 ist demnach etwa in der Mitte der Plattenkalke auf die tiefsten Schichten des Trigonodusdolomits der Schuppe 1 aufgeschoben.

In der im Bereich zwischen den Schuppen 2 und 3 angesetzten Kernbohrung manifestierte sich die tektonische Störung als Reibungsflächen und als hoher Kernverlust. Einschließlich der nach dem Kernbefund 5–8° geneigten und zur Schuppe 2 gehörenden basalen oolithischen Bank und der Störungszone wurden nur 11 m statt etwa 18 m Trigonodusdolomit durchfahren. Der basale Trigonodusdolomit der Schuppe 2 ist somit unter die oberen Trigonodusdolomit-Schichten der Schuppe 3 geschoben worden.

Als Ganzes ergibt sich eine zwischen die Schuppen 1 und 3 hochgepreßte Schuppe 2. In der Nähe der zwischen den Schuppen 2 und 3 verlaufenden

Störung dürfte auch noch der Untere Keuper der Schuppe 3 gestört und dabei dessen Bohrlänge gegenüber der Normalmächtigkeit vergrößert worden sein. Für die darüber folgende Gipskeuper-Serie der Schuppe 3, welche oben durch die Aufschiebung der Hauenstein-Antiklinale abgeschnitten wird (Fig. 2), kann nach der mit dem Dottenberg-Südschenkel vergleichbaren Detailstratigraphie eine verhältnismäßig flache Schichtneigung angenommen werden, welche das sich aus der Profilkonstruktion (Fig. 2) im Süden des Leutschenberg-Südschenkels ergebende generelle Einfallen von ca. 15° kaum übertrifft.

2.4 Kern der Hauenstein-Antiklinale

Eine mit Bohrung 3 zwischen 393 m und 424 m in Gipskeuper und Unterem Keuper durchfahrene Schuppe betrachten wir als Kern der Hauenstein-Antiklinale (Fig. 2). Sie entspricht nach ihrer tektonischen Lage der mit dem Hauenstein-Basistunnel (Fig. 2) zwischen km 2.159 und km 2.275 ab Südportal im Gipskeuper, Unterem Keuper und obersten Trigonodusdolomit durchhörterten «intermediären Schuppenserie» (BUXTORF 1916).

Ein Nordschenkel der Hauenstein-Antiklinale ist im Hauenstein-Basistunnel als stark verschürfter Gipskeuper nördlich des gewölbeartig aufgebogenen Trigonodusdolomits angedeutet (BUXTORF 1916), in der Bohrung Lostorf 3 aber nicht erkennbar.

Die Aufschiebung des Kerns der Hauenstein-Antiklinale zeigt sich in Bohrung 3 darin, daß die obersten Schichten der Gipskeuper-Serie des Leutschenberg-Südschenkels abgeschnitten sind, daß sich statt dessen auf 5 m Bohrlänge noch eine kleine Schuppe aus Mergeln der Unterem Mergel- und Schilfsandsteingruppe einschaltet, bei deren Durchfahren eine ungewöhnlich starke Vibration des Bohrgestänges auftrat, und daß darüber die in der normalen Schichtenfolge rund 100 m tieferen Schichten des Unterem Keupers folgen.

Im Profil der Bohrung Lostorf 3 ist der auf den Leutschenberg-Südschenkel überschobene Kern der Hauenstein-Antiklinale seinerseits von deren Südschenkel überfahren worden und dabei als verhältnismäßig dünne Schuppe in der Tiefe zurückgeblieben. Über dem Hauenstein-Basistunnel und westlich der Bohrungen von Bad Lostorf ist diese Schuppe des Gewölbe-Kerns als schmale Keuper-Zone noch bis zur Höhe des heutigen Geländes hochgeschleppt, aber auch hier vom älteren Muschelkalk des Südschenkels überfahren worden (BARTHOLET 1964). Erst östlich von Bad Lostorf entwickelt sich eine einigermaßen normale Antiklinale, deren Nordschenkel aber «gepreßt und ausgeschert» (GSELL 1968) ist.

2.5 Dottenberg-Südschenkel (Dottenberg-Aufschiebung)

Den über den Kern aufgeschobenen Südschenkel der Hauenstein-Antiklinale, welcher südlich der Bohrungen mit seinem Dogger den Kamm des Dottenbergs bildet, bezeichnen wir kurz als Dottenberg-Südschenkel (BARTHOLET 1964) oder als Dottenberg-Aufschiebung (Fig. 1 und 2).

Westlich der Bohrungen von Bad Lostorf lassen die oberflächlichen Aufschlüsse den Verlauf der das Gelände schneidenden Aufschreibungsfläche erkennen. Die ältesten bis zum Niveau des heutigen Geländes aufgeschobenen Schichten gehören hier zum Hauptmuschelkalk (Oberer Muschelkalk, Fig. 1). Ab etwa 600–700 m westlich der Bohrungen Lostorf (2–4) ist die ausstreichende Aufschreibungsfläche auf eine Länge von rund 1300 m durch das über sie nach Süden zurückgeglittene Falkenstein-Gleitpaket bedeckt (Fig. 1). Dort, wo sie östlich Bad Lostorf wieder zutage tritt, ist nicht mehr der Hauptmuschelkalk, sondern nur noch der Gipskeuper bis zum heutigen Gelände aufgeschoben.

In Bohrung 3 beginnt die aufgeschobene Schichtserie bei 393 m Tiefe mit dem über den Gipskeuper des Antiklinal-Kerns überschobenen Mittleren Muschelkalk und endet oben im Unteren Lias. Die Bohrungen 2 und 4 haben diese Schichtenfolge nur bis hinunter zum Trigonodusdolomit erschlossen.

In Bohrkernen des Unteren Keupers der Bohrungen 2 und 4 konnten Schichtfallen⁴ von 44–52°, in solchen des Gipskeuper-Basisanhydrits der Bohrung 3 solche von 50–55° gemessen werden.

Mit den in den Bohrungen 2, 3 und 4 durch je drei Punkte belegten Schichtflächen (Koordinaten der Bohrungen und Höhenkoten) ergeben sich rechnerisch die in Tabelle 4 zusammengestellten Azimutwinkel des Fallens und Winkel des Einfallens.

Die Schichten streichen⁵ somit etwa 65° (bezogen auf das Netz der Landeskoordinaten) oder ungefähr Ostnordost und damit ähnlich wie der im Hauptrogenstein oberflächlich aufgeschlossene Dottenberg-Südschenkel (Karte BARTHOLET 1964).

Im Bereich zwischen der Obergrenze des Trigonodusdolomits und dem untersten Gipskeuper ist das sich aus je drei Punkten ergebende mittlere Schichtfallen von 57,6° größer als die an den Bohrkernen gemessenen Winkel der Schichtflächen. Da einerseits einzelne, in den Bohrkernen meßbare Schichtflächen nicht streng parallel zu der im großen maßgebenden Schichtlagerung verlaufen müssen und andererseits zwischen den drei Bohrungen kleinere tektonische Störungen vorhanden sein und etwas zu große Schichtneigungen vortäuschen mögen, betrachten wir ein mittleres Fallen von etwa 55° am ehesten als repräsentativ.

⁴ Neigung einer Gesteinsschicht gegen die Horizontale.

⁵ Streichen = Richtung der Schnittlinie einer geologischen Fläche zur Horizontalebene, verläuft senkrecht zum Fallen.

Tabelle 4
Einfallen der Schichtflächen im Dreieck der Bohrungen 2, 3 und 4

Obergrenze der Schicht (vgl. Stratigraphie, Ziff. 3)	Azimut des Fallens	Winkel des Fallens (Schichtneigung)
Bituminöse Basis-Schicht der Unteren Mergel- und Schilfsandsteingruppe	158,9°	59,6°
Oberste Schichtserie des Gipskeupers (9)	155,40°	62,7°
Schichtserie des Gipskeupers mit Gipsbänken (8) .	152,0°	64,1°
Schwach bituminöser Gips-Tonstein-Horizont (7) .	158,3°	62,7°
Basis-Anhydrit des Gipskeupers (1)	150,1°	58,7°
Grenzdolomit	156,2°	56,4°
Estherienschiefer	158,3°	58,3°
Trigonodusdolomit	150,3°	56,8°
<i>Mittel</i>	154,9°	59,9°
Mittel der vier höheren Schichtflächen	156,2°	62,3°
Mittel der vier tieferen Schichtflächen	153,7°	57,6°
Mittel aller acht Schichtflächen	154,9°	59,9°

Eine gewisse Kontrolle ergeben Baugrundbohrungen, die rund 170 bis 270 m östlich der Mineralwasserbohrungen für den Neubau des Bades Lostorf ausgeführt worden sind und als Felsuntergrund durchwegs die Opalinustone des Dottenberg-Südschenkels angetroffen haben.

Von der Lias-Untergrenze bei Bohrung 3 ausgehend (Koordinaten 637326,5/249341,6, Kote 504.23) und unter Annahme einer Lias-Mächtigkeit von 35 m, einer Opalinuston-Mächtigkeit von 100 m, eines Azimuts des Streichens von 65° und eines Fallwinkels von 55° erhalten wir an den Orten der nordnordwestlichsten und der südsüdöstlichsten jener Baugrundbohrungen folgende Koten des Opalinuston-Bereichs:

Tabelle 5
Höhenlage der Opalinustone in Baugrundbohrungen des Badneubaus

Bohrung	BB 8	BB 4
Koordinaten	637494/249259	627595/249254
Theoretische Koten der Ober- und der Untergrenze der Opalinstone	661–487	595–421
Koten-Bereich der zwischen Felsoberfläche und Bohrlochsohle effektiv erbohrten Opalinustone	526.61–524.76	500.01–498.06

Die Opalinustone liegen somit beim neuen Badgebäude in einem Höhenbereich, in welchem sie auch von den Daten der Bohrung 3 ausgehend theoretisch zu erwarten gewesen wären. Bei der nordnordwestlichen Bohrung BB 8 ist die Untergrenze der Opalinustone erst rund 40 m unter der Felsoberfläche zu erwarten. Ihre Untergrenze würde aber schon 28 m nordnordwestlich dieser Bohrung ein gleiches Felsoberflächen-Niveau schneiden. Das heißt, daß auch bei einem gewissen Anstieg der Felsoberfläche unweit nordnordwestlich (oberhalb) des Bades der Lias als Felsuntergrund zu erwarten ist (vgl. Profil durch die alte Gipsquelle auf Figur 2).

2.6 *Tektonische Verhältnisse südlich der Bohrungen*

Die Dottenberg-Aufschiebung leitet nach Süden zur breit angelegten Aaretal-Synklinale (GSELL 1968) über. Im Süden dieser Mulde ist der Malm zur südlichsten Jurafalte, der Born-Engelberg-Antiklinale (Fig. 3), aufgebogen. Trias, Lias und Dogger treten jedoch hier nicht mehr zutage. Im Gebiet des schließlich südlich an die Born-Engelberg-Antiklinale anschließenden Molasse-Beckens (Fig. 3) sind die triadischen und jurassischen Schichten mit mächtigen tertiären Ablagerungen bedeckt und tauchen, mit veränderter Fazies, erst am Nordrand des Aarmassivs wieder auf (Fig. 3).

2.7 *Falkenstein-Gleitpaket*

Aus den oberflächlichen Aufschlüssen und den morphologischen Verhältnissen hatte HARTMANN (1917) geschlossen, daß nördlich Bad Lostorf ein den Hauptrogenstein und Schichten des Unterer Doggers umfassendes, rund 1 km breites Schichtpaket des Leutschenberg-Südschenkels gegen Süden abgegliitten ist (Fig. 1). Der Abriß dieses Gleitpaketes wird 1,4 km nördlich der Bohrungen 2–4 durch ein oberflächlich abflußloses Tälchen bei «Felli» markiert. Die Gleitscholle ist in sich stark durch Nord-Süd verlaufende Störungen zerbrochen (HARTMANN 1917, BARTHOLET 1964, GSELL 1968), und im Falkenstein-Tälchen ist eine Teilscholle nochmals abgerissen und weiter gegen Süden abgegliitten. HARTMANN (1917) schätzte das Volumen dieses «Bergrutschs von Lostorf» zu 150 Millionen m³, was eher die untere Grenze der bewegten Masse sein dürfte, womit sie die Masse des Bergsturzes von Goldau aber bereits um das Fünffache übertrifft.

Das Schichtpaket kann erst nach der Erosion des bei Bad Lostorf West-Ost verlaufenden Tals in dieses abgegliitten sein. Die Bohrungen 2, 3 und 4 haben nun direkt nachgewiesen, daß das Gleitpaket die im Lias und Keuper des Dottenberg-Südschenkels durch Erosion entstandene Landoberfläche überfahren hat (Fig. 2). Bei den Bohrstellen liegen 40–41 m Hauptrogenstein und Blagdeni-Schichten des Gleitpaketes auf dem erodierten Unterer Lias

des Dottenberg-Südschenkels. Aus dem im Westen und im Osten des Gleitpaketes bekannten Verlauf der ausstreichenden Aufschiebungsfläche des Dottenberg-Südschenkels läßt sich ableiten, daß diese etwa 200 m nördlich der Bohrungen unter der Gleitmasse begraben liegt (Fig. 2). Die Profilkonstruktion weist darauf hin, daß die Gleitfläche im Leutschenberg-Südschenkel innerhalb des Unteren Doggers in Schichten verläuft, die höher als die Opalinustone liegen, wahrscheinlich in den andernorts auch als Gleithorizont junger Rutschungen bekannten tonigen Sowerbyi-Schichten⁶.

Bei Bohrung 1 im «Schwefelloch» gehören die ab 12 m bis zur Endteufe von 25 m angetroffenen Blagdeni-Schichten nach ihrer geologischen Situation ebenfalls zu einer nach der Erosion des Tals gegen Süden zurückgeglittenen Gleitmasse. Hier beim tiefsten Erosionseinschnitt des Tals konnte nicht nur das Falkenstein-Gleitpaket an seinem östlichen Rand am weitesten gegen Süden abgleiten. Die geologischen und morphologischen Verhältnisse lassen darauf schließen, daß auch eine Scholle des östlich des Falkenstein-Gleitpakets in die Altenbrunnen-Synklinale übergehenden Doggers nach Südsüdwesten gegen den tiefsten Erosionseinschnitt abgeglitten ist (Fig. 1) und als Abrißnarbe die «eigenartige Vertiefung» (HARTMANN 1917) bei Altenbrunnen (Koordinaten 638000/250000) hinterlassen hat, welche wie das durch den Abriß des großen Falkenstein-Gleitpakets entstandene Tälchen von «Felli» oberflächlich abflußlos ist (HARTMANN erklärte diese «eigenartige Vertiefung» dagegen damit, daß sich der «Bergrutsch» des Falkensteins in den unteren Teil eines Erosionstälchens hineinschob und dessen oberen Teil abschnitt).

2.8 Querstörung von Lostorf

Das neu mit Bohrung 1 gefäßte Mineralwasser Lostorf 2 entspringt in der südlichen Fortsetzung der das Falkenstein-Gleitpaket im Osten begrenzenden Bewegungsfuge (Fig. 1). Der hohe Natrium-Chlorid-Gehalt des Mineralwassers zwingt zum Schluß, daß es aus dem Muschelkalk stammt. Allein diese Verhältnisse legen nahe, daß der Aufstieg des Mineralwassers durch eine Querstörung begünstigt sein kann, welche die östliche Bewegungsfuge des Falkenstein-Gleitpakets zwar vorgezeichnet hat, die aber älter als diese Bewegung ist, tiefer reicht und sich nach Süden unter den Alluvionen des Quertals fortsetzt.

Eine nicht vorausgesehene, unbeabsichtigte Markierung des Mineralwassers in Bohrung 1 hat diese Hypothese erhärtet. Beim Abteufen der Bohrung und dann bei der Förderung großer Wassermengen ($> 60 \text{ l/min}$) aus der Bohrung traten nämlich jeweils kurz danach in einer rund 500 m südsüdöstlich über dem Hauptrogenstein des Dottenberg-Südschenkels aus der

⁶ Formation im Unteren Dogger, nach dem Fossil «Ammonites» sowerbyi benannt.

Sohle des Quertals austretenden Quelle vorübergehend nicht nur eine Trübung, sondern auch hohe Chlorid-Konzentrationen und zeitweise Schwefelwasserstoff auf. Nach den zu Beginn der Pumpversuche höchsten Werten zeigte sich jeweils eine abnehmende Tendenz der Chlorid-Konzentrationen. Die beim Bohren und bei starkem Abpumpen bewirkte starke Turbulenz bewirkte offenbar, daß das Mineralwasser von Bohrung 1 längs der anzunehmenden wasserwegsamen Querstörung teilweise rasch gegen Süden zu der 500 m entfernten Quelle abströmen konnte. Diese südliche Abströmung dürfte dann jeweils im Laufe des Pumpbetriebs wegen des um Bohrung 1 herum erzeugten Senktrichters zurückgegangen sein.

Die Querstörung (Fig. 1), welche in geologisch junger Zeit dann die Bewegungsfuge an der östlichen Begrenzung des Falkenstein-Gleitpakets bildete und welche den Aufstieg sowie unter besonderen Umständen eine teilweise südliche Abströmung des Mineralwassers Lostorf 2 ermöglicht, hat offensichtlich auch das zwischen Bad und Dorf Lostorf im Dogger und Malm den Dottenberg-Südschenkel durchbrechende Quertal vorgezeichnet. In ihrer südsüdöstlichen Fortsetzung finden wir eine Verwerfung nordöstlich Obergösgen (GOLDSCHMID 1965, GSELL 1968) und schließlich das Ostende der Born-Engelberg-Antiklinale (GOLDSCHMID 1965, Tektonische Übersicht 1:50000), was weitere Indizien für die Existenz einer tektonisch bedeutsamen Querstörung sind.

2.9 Sockel des Faltenjuras

Alle mit den Bohrungen von Bad Lostorf durchfahrenen tektonischen Einheiten gehörten zur Schichtplatte, die im Süden auf der Salzzone des Mittleren Muschelkalks abgesichert, im Norden auf den Tafeljura geschoben und dadurch, daß sich einzelne Teile an Aufschiebungsfächern losgelöst haben, in sich weiter gegliedert worden ist (Fig.3). In der von ihrer Unterlage abgesicherten Schichtplatte sind der über den Leutschenberg-Südschenkel aufgeschobene Kern der Hauenstein-Antiklinale und der wiederum über diesen aufgeschobene Dottenberg-Südschenkel (Fig.2) nicht mehr als «Abspaltungen, die sich bildeten, als der Widerstand der überschobenen Massen im Norden zu groß wurde. Man sieht förmlich, wie sich der Dottenberg vor dem Hindernis aufgebäumt hat» (BUXTORF 1916).

Wie weit südlich, in welcher Tiefe und auf welche Weise die zum Faltenjura zusammengepreßte Schichtplatte, deren Stirn heute rund 4 km nördlich Bad Lostorf über dem Tafeljura liegt, von diesem abgetrennt wurde, bleibt auch nach den neuen Bohrungen ungewiß.

Im Hauenstein-Basistunnel ist der Faltenjura etwa 1050 m nördlich der Aufschiebung der Hauenstein-Antiklinale mit seinem Mittleren Muschelkalk (Sulfatzone) auf das Tertiär des Tafeljuras überschoben, welches dort mit 25° nach Süden einfällt (Fig.2). Weiter nördlich, wo das Tertiär eine

flachere Lagerung hat, sind zunächst der Malm (Effinger- und Birmenstorferschichten), dann der Dogger (Callovien und Hauptrogenstein) seine im Tunnel angetroffene Unterlage. Die steiler als das sie überlagernde Tertiär mit etwa 20° gegen Südsüdosten einfallenden Malm- und Dogger-Schichten und die in der Zeit zwischen Jura und Tertiär von Süden nach Norden in zunehmend ältere, stratigraphisch tiefere Schichten erodierte Auflagerungsfläche des Tertiärs beweisen, daß die Juratafel schon lange vor der Jurafaltung nach Süden abgebogen worden ist.

Im Tunnel liegt die Hauptüberschiebungsfläche auf ca. 427 m ü. M.; mit Bohrung Lostorf 3 ist sie auf etwa 35 m unter Meer noch nicht erreicht worden (Fig. 2). Senkrecht zum generellen Einfallen der Schichten auf ein durch Bad Lostorf gehendes Jura-Querprofil projiziert, liegt der Tunnelaufschluß der Hauptüberschiebungsfläche etwa 1,2 km nördlich der Bohrung 3. Aus der Höhendifferenz von mehr als 462 m ergibt sich eine Neigung über 21° . Wenn wir von der Bohrlochsohle aus mit den normalen Mächtigkeiten der nicht erbohrten Schichten die Lage des die Abscherung bewirkenden ehemaligen Salzhorizonts extrapoliieren, erhalten wir für die Hauptüberschiebungsfläche ein Niveau von etwa 120 m unter Meer. Das heißt, daß die Neigung etwa $24\text{--}25^\circ$ betrüge und noch gleich wäre wie die der südlichsten Tertiär-Schichten im Tunnel und der dort «fast parallel» (BUXTORF) gehenden Überschiebungsfläche (Fig. 2).

Obwohl die Bohrung 3 die Juratektonik rund 370 m tiefer als der mit dem Tunnel bisher tiefste Aufschluß aufgeklärt hat, gibt sie keine direkte Auskunft darüber, ob an ihrem Standort unter der Abscherungsfläche bereits die das Liegende des Salzhorizonts bildenden älteren Schichten des Sockels oder aber, wie im Hauenstein-Basistunnel, noch überschobene jüngere Schichten des Tafeljuras vorkommen. BUXTORF (1916) nahm hypothetisch an, daß zwar die Hauptüberschiebungsfläche, ähnlich wie durch die Bohrung 3 im Prinzip nun nachgewiesen, gegen Süden abfällt, daß aber die im Tunnelaufschluß ebenfalls noch nach Süden einfallenden Schichten des Tafeljuras weiter südlich aufgebogen werden. Der Südrand des Tafeljuras, wo ehemals der Kontakt mit der später weit nach Norden verfrachteten Stirn des Faltenjuras bestanden hätte, läge nach dieser Hypothese etwa unter dem Dottenberg.

In einem von LAUBSCHER (1965) entworfenen Profil fällt der Tafeljura bis unter den Dottenberg nach Süden ab und endet dort an einem etwa 400 m hohen Sprung gegen eine südliche Hochscholle des unter dem Salzhorizont liegenden Sockels. Das über dem Salzhorizont der südlichen Hochscholle abgescherte Schichtpaket ist nach dieser hypothetischen Darstellung vom obersten Punkt des im Sockel⁷ verlaufenden Sprungs aus über die Tiefenscholle des Tafeljuras geschoben worden. Ein solcher Sockelsprung (Fig. 3) erleichtert eine plausible Profilkonstruktion und wurde als Hypothese in

⁷ Im Faltenjura die tieferen, von der Faltung nicht betroffenen Schichten.

unserem Profil ebenfalls angenommen, und zwar, um die extreme Möglichkeit darzulegen und das Prinzip des Schubs von der südlichen Hochscholle über die nördliche Tiefscholle zu verdeutlichen, mit einer noch größeren Sprunghöhe als von LAUBSCHER.

Da Aufschlüsse der unter dem Salzhorizont bis hinunter zum Grundgebirge folgenden Schichten im Faltenjura fehlen, müssen auch alle Annahmen über deren bei Bad Lostorf vorhandene Mächtigkeit vorläufig Hypothesen bleiben. Welche Möglichkeiten weiterer Vorkommen von Mineralwässern und Thermen im Untergrund von Bad Lostorf prognostisch bestehen, hängt davon ab, welche tektonischen Strukturen unter der Hauptüberschiebungsfäche wirklich vorkommen und welche Beschaffenheit und welche Mächtigkeit die bisher in der Tiefe verborgenen Schichten zwischen Salzhorizont und Grundgebirge haben. Dies alles könnte aber nur durch eine tiefere Bohrung schlüssig geklärt werden.

3. Stratigraphie (Schichtenfolge)

3.1 Methodik und Allgemeines

3.11 Cuttings

Die stratigraphische und damit auch die tektonische Gliederung der in den Bohrungen 2, 3 und 4 angetroffenen Schichten stützt sich im wesentlichen auf die lithologische Untersuchung des beim Spülbohren mit der Spülung zutage geförderten Bohrguts (Cuttings). Die Genauigkeit der damit möglichen Tiefenangaben ist nicht größer als etwa 1 m.

3.12 Kernbohrungen

Kernbohrungen wurden bei allen Bohrungen gezielt angesetzt, wenn der Untere Keuper prognostisch bald zu erwarten oder bereits erreicht war. Hier bestand am ehesten Aussicht, in den Kernen das Einfallen der Schichten gut messen zu können.

Bei Bohrung 3 wurde ferner in zwei stark zerklüfteten Zonen mit Kernbohrung vorsondert.

Die Bohrkerne stammten aus folgenden Tiefen:

Tabelle 6
Tiefen der Bohrkerne

Bohrung 2	250,00–253,80 m
Bohrung 3	240,20–247,00 m
	534,00–540,00 m
	582,80–584,00 m
Bohrung 4	248,00–254,00 m

3.13 Geophysikalische Bohrlochmessungen

Als Hilfsmittel einer genaueren Gliederung der Schichtenfolge und zum Erkennen der relativen Wasserdurchlässigkeit verschiedener Horizonte dienten geophysikalische Bohrlochmessungen in Bohrung 3.

Ein erstes Gamma-Ray-Log nahm die Firma Duret & Reber am 24./25.3. 1972 bis zu einer Tiefe von 354,5 m auf, als der obere Mineralwasserhorizont durchfahren und das Bohrloch bis 247,00 m mit Stahlrohren $\varnothing 16''$ und PVC-Rohren $\varnothing 350$ mm verrohrt war. Die Firma Schlumberger führte dann

am 9.6.1972 bis 525 m ein GRN-Log aus, als die Bohrung ihre Endtiefen erreicht hatte und definitiv verrohrt war (Fig. 4). Auf gleichzeitige Messungen der Temperaturen und die Aufnahme eines Flow-Meter-Logs wird noch zurückzukommen sein.

Mit dem GRN-Log (Gamma-Ray-Neutron-Log) werden die Gamma-Strahlung⁸ der Gesteine (Gamma-Log) und die beim Beschuß der Gesteine mit Neutronen⁹ verbleibende Strahlung gemessen.

In einer sedimentären Schichtenfolge zeichnen sich vor allem tonhaltige Gesteine durch eine erhöhte *Gamma-Strahlung* aus. Dies ist auf den Gehalt der Tonminerale an radioaktivem Kalium-Isotop K⁴⁰ zurückzuführen. Von anderen Bohrungen war ferner bekannt, daß in der Schilfsandsteingruppe und in Estherienschiefern (Unterer Keuper) stark erhöhte Gamma-Strahlungen regional verbreitet sind, was sich auch bei der Aufnahme der Bohrung Lostorf 3 bestätigt hat.

Die Neutronen verlieren ihre Energie in erster Linie durch Zusammenstoß mit Wasserstoffkernen. Wenn hohe Wasserstoffkonzentrationen in der Umgebung der Strahlungsquelle vorkommen, ist deshalb der Anzeigewert des *Neutron-Logs* gering. Umgekehrt bewirken geringe Wasserstoffgehalte eines Gesteins erhöhte Anzeigen. In einem grundwasserführenden porösen und tonfreien Gestein ist der Wasserstoffgehalt ein Maß für die Porosität. In tonigen Gesteinen sind jedoch niedrige Anzeigewerte des Neutron-Logs auf Wasser zurückzuführen, das im Gitter der Tonminerale eingebaut oder adsorptiv an den Ton gebunden ist. Reiner Ton ergibt Anzeigen wie ein tonfreies Gestein mit etwa 40 % Porosität.

3.14 Schichtneigung und Schichtmächtigkeiten

Bei geneigter Schichtlagerung geben die erbohrten Längen zu große scheinbare Schichtmächtigkeiten an. Für die Ermittlung der wahren Schichtmächtigkeiten rechnen wir im Dottenberg-Südschenkel mit einer mittleren Schichtneigung von 55°, im Leutschenberg-Südschenkel (Schuppe 3) dagegen mit einer verhältnismäßig flachen Lagerung, bei welcher die wahren annähernd gleich groß wie die scheinbaren Schichtmächtigkeiten sind (bei einer Schichtneigung von z.B. 15° wäre die wahre Schichtmächtigkeit nur 3,4 % kleiner als die scheinbare). Die getroffenen Annahmen wurden bei der Besprechung der Tektonik (Zif. 2.5) näher begründet.

3.15 Repetition von Schichtenfolgen

Mit den Bohrungen sind Schichten vom Mittleren Muschelkalk bis zum Hauptrogenstein durchfahren worden. In Bohrung 3 finden sich einige

⁸ Beim Zerfall von radioaktiven Substanzen auftretende Strahlung.

⁹ Einer der Bausteine des Atomkerns, ladungsfreies Elementarteilchen.

Schichtgruppen mehrfach in verschiedenen tektonischen Einheiten, nämlich von oben nach unten in

- Dottenberg-Südschenkel (aufgeschobene Schichtplatte des Dottenbergs),
- Kern der Hauenstein-Antiklinale,
- Leutschenberg-Südschenkel mit drei Schuppen (Südschenkel der Leutschenberg-Antiklinale).

3.16 Bohrprofile

Eine Zusammenfassung der von Herrn Dr. A. TERZIDIS detailliert aufgenommenen Bohrprofile geben wir in Tabelle 7 und Figur 4.

Tabelle 7
Zusammenfassende Bohrprofile

Bohrung MB	Tiefe der Untergrenze in m			Scheinbare Mächtigkeit in m		
	2	3	4	2	3	4
<i>Künstliche Auffüllung</i>	4,50	4,50	2,00	4,50	4,50	2,00
Falkenstein-Gleitpaket						
<i>Unterer Hauprogenstein</i> (Dogger)						
Kalke, oolithisch, beige-grau, Spülungsverluste in MB 3 bis 10 m, unten (in MB 4 ab 10 m, in MB 3 ab 19 m) Mergelzwischenlagen ...	18,00	20,00	13,00	13,50	15,50	11,00
<i>Blagdeni-Schichten</i> (Dogger)						
Mergel, gelb-braun und grau, mit Mergelkalkzwischenlagen, Bruch- stücke von Belemniten und Schalenreste	41,00	40,00	40,00	13,00	20,00	27,00
Dottenberg-Aufschiebung						
<i>Unterer Lias</i>						
Kalke, grau, mit Mergelzwischen- lagen, Crinoiden- und Belemniten- bruchstücke, Gamma-Strahlungs- Tief (MB 3)	51,00	45,00	45,00	10,00	5,00	5,00
<i>Obere bunte Mergel</i> (Keuper)						
Mergel, grau, rötlich (z. T. grün gefleckt) und grün-grau, Gamma- Ray vom Lias her ansteigend (MB 3)	-	52,00	58,00	-	7,00	13,00

Tabelle 7 (Fortsetzung)

Bohrung MB	Tiefe der Untergrenze in m			Scheinbare Mächtigkeit in m		
	2	3	4	2	3	4
<i>Hauptsteinmergel (Keuper)</i>						
Mergel, rotbraun und rot, hellgelbe und hellgelbbraune Dolomitmergellagen (in MB 4 ab 61 m) ...	—	56,00	62,00	—	4,00	4,00
<i>Untere bunte Mergel- und Schilfsandsteingruppe (Keuper)</i>						
Mergel, vorwiegend grau, grüngrau, z. T. auch rotbraun (MB 4 68 bis 69 m) oder rotbraun gefleckt, meist schwach feinsandig, z. T. Sandmergel-Lagen (MB 2 62–70 m), unten mit gelben Dolomitmergellagen (MB 3 ab 60 m, MB 4 ab 69 m)	79,00	63,00	72,00	21,00	7,00	10,00
Mergel, grau, schwarz, bituminös (MB 3 ab 64 m stark), H ₂ S-Geruch, z. T. schiefrig (MB 3 ab 64 m), Dolomitmergellagen, Gamma-Ray-Peak (MB 3 bei 64–65 m)	—	65,00	73,00	—	2,00	1,00
Mergel und Tonsteine, grüngrau, unten z. T. schwarz (MB 4 ab 76 m), z. T. schwach feinsandig, Dolomitmergellagen (MB 3 und MB 4), z. T. mit Spuren von Gips und rotbraun gefleckt (MB 2)	83,00	69,00	77,00	4,00	4,00	4,00
Mergel und Tonsteine, schwarz, grau, bituminös und H ₂ S-Geruch (MB 2 und MB 4) oder kleiner Gamma-Ray-Peak (MB 3 bei ca. 70 m), z. T. schwach feinsandig ...	86,00	~70	78,00	3,00	1,00	1,00
<i>Gipskeuper</i>						
Mergel und Tonsteine, grau, grüngrau, z. T. rotbraun oder schwarz, Dolomit- und Dolomitmergellagen, Gips, z. T. nur in Spuren (MB 3 erst ab 78 m), z. T. schwach bituminös (MB 3 89–90 m), breites Gamma-Ray-Hoch (MB 3 82–90 m)	109	92	100	23,00	22,00	22,00

Tabelle 7 (Fortsetzung)

Bohrung MB	Tiefe der Untergrenze in m			Scheinbare Mächtigkeit in m		
	2	3	4	2	3	4
Gips in Bänken von 5–8 m (scheinbare Mächtigkeit), weiß, grau, rosa, z. T. mit Anhydrit, Lagen von roten und grauen Mergeln	120	104	113	11,00	12,00	13,00
Gips, grau, z. T. rot oder rosa, mit schwach bituminösen Mergeln und Tonsteinen (MB 3) oder gips- führende Tonsteine, schwarz, grau, schwach bituminös (MB 2, MB 4), Gamma-Ray-Peak (MB 3)	121	106	114	1,00	2,00	1,00
Tonsteine, grau, grüngrau, rötlich- grau, mit Gips, z. T. in Bänken von 1–4 m, z. T. schwach bituminös, wenig Anhydrit	168	152	154	47,00	46,00	40,00
Tonsteine und Mergel, grau, rot, rotbraun, mit Gips (keine bedeu- tenden Bänke), wenig Anhydrit, vereinzelte dolomitische Lagen ...	250	235	238	82,00	83,00	84,00
Tonsteine, grau, Lagen von hell- braunen Dolomiten, Gips	-	236	240	-	1,00	2,00
Tonsteine, grau, schwarz, schwach bituminös, z. T. mit Gips und Anhydrit, z. T. mit Dolomit (MB 3 und MB 4), H ₂ S-Geruch und Schalenabdrücke (MB 2)	250,5	237	241	0,50	1,00	1,00
Tonstein, Gips	-	-	243	-	-	2,00
Anhydrit, dunkelbraungrau, z. T. fein gebändert mit Dolomitmergel (Kern MB 2, Schichtfallen 50–55°), z. T. vergipst (MB 3), z. T. schwach bituminöse Tonsteinlagen (MB 3, 241–242 m in MB 4), Gamma-Ray- Peak (238 m in MB 3)	253,45	241,10	247,70	2,95	4,10	4,70

Grenzdolomit (Unterer Keuper)

Dolomit, beige-grau, z. T. fein ge-
bändert, schwarze bituminöse mm-
dünne Schichten, Ölgeruch (MB 4),

Tabelle 7 (Fortsetzung)

Bohrung MB	Tiefe der Untergrenze in m			Scheinbare Mächtigkeit in m		
	2	3	4	2	3	4
mit Gips gefüllte Klüfte (MB 3), Gips- und Anhydritlagen (MB 3, MB 4), Pyrit, Schill-Lagen, Schicht- fallen 44–52° (Kern MB 3), 48–50° (Kern MB 4)	257	243,7	251,2	3,55	2,60	3,50
<i>Estherienschiefer</i> (Unterer Keuper)						
Dolomitmergel, grau bis schwarz, z. T. schiefrig, bituminös; Gamma- Ray-Peak (MB 3), wenige ver- gipste Anhydritlagen, Schichtfallen 44–52°, an der Basis 0,2 mm Dolo- mit mit Schill, <i>Myophoria</i> und Pyrit (Kerne MB 3 und MB 4) . . .	259,5	247	252,6	2,50	3,30	1,40
<i>Trigonodusdolomit</i> (Oberer Muschelkalk)						
Dolomit, hellbeigegrau, Silex- Lagen, Klüfte mit Calcit, z. T. klüftig und kavernös, Spülungs- verluste (MB 2 ab 259,50 m, MB 3 ab 247 m), Basis oolithisch (MB 3 ab 277 m)	>280	278	>280	>20,50	31,00	>27,40
<i>Plattenkalke</i> (Oberer Muschelkalk)						
Kalk, grau, z. T. dolomitisch, oben (bis 280 m) oolithisch, unten (310–311 m und 315–316 m) Mergel- und Mergelkalk-Lagen, z. T. glaukonitisch	316			38,00		
<i>Trochitenkalke</i> (Oberer Muschelkalk)						
Kalk, grau, z. T. trochitisch, <i>Encrinus liliiformis</i> , unten (ab 344 m) schwach oolithisch, Spülungs- verluste	346			30,00		
<i>Dolomitzone</i> (Mittlerer Muschelkalk)						
Dolomit, beigebraun, oben (bis 348 m) kalkig, Silexe	361			15,00		

Tabelle 7 (Fortsetzung)

Bohrung MB	Tiefe der Untergrenze in m			Scheinbare Mächtigkeit in m		
	2	3	4	2	3	4
<i>Sulfatzone</i> (Mittlerer Muschelkalk)						
Mergel, Dolomitmergel und Tonsteine, grau, mit Anhydrit und Gips	393			32,00		
Kern der Hauenstein-Antiklinale						
<i>Gipskeuper</i>						
Tonsteine, grau, rötlichgrau und rotbraun, mit viel Gips und Anhydrit, z. T. schwach bituminös (407 m), Gamma-Ray-Peaks bei 407 m und 409 m	412			19,00		
Anhydrit, grau und graugrün, einzelne Dolomitmergellagen	415			3,00		
<i>Grenzdolomit</i> (Unterer Keuper)						
Dolomit, beige-grau	419			4,00		
<i>Estherienschiefer</i> (Unterer Keuper)						
Mergel, dunkelgrau, z. T. bituminös und schiefrig, Dolomitlagen	424			5,00		
Südschenkel der aufgeschobenen Leutschenberg-Antiklinale						
<i>Untere bunte Mergel- und Schilf-sandsteingruppe</i> (Keuper)						
Mergel, dunkel- und grüngrau, rotbraun, beige-braune Dolomite, ungewöhnlich starke Vibration des Bohrgestänges von 419–429 m (Tektonische Störung!), Gamma-Ray-Peak bei 428 m	429			5,00		
<i>Gipskeuper</i>						
Tonstein, z. T. dolomitisch, und Dolomite (433–435 m), dunkelgrau, schwarz, bituminös (ab 430 m), H ₂ S-Geruch, breites Gamma-Ray-Hoch mit Schwankungen (430 bis 435 m)	438			9,00		

Tabelle 7 (Fortsetzung)

Bohrung MB	Tiefe der Untergrenze in m			Scheinbare Mächtigkeit in m		
	2	3	4	2	3	4
Mergel, grau, z. T. rot und schwarz, schwach bituminös, Gips, eine größere Gipsbank mit Tonstein- zwischenlagen (444–448 m)	456			18,00		
Tonsteine, grau, rotbraun, rot, Gips, z. T. in Bänken von 2–5 m, wenig Anhydrit	500,8			44,80		
Tonstein, grau, z. T. dunkelrot gefleckt, wenig Gips und Anhydrit, z. T. schwach bituminös, Gamma- Ray-Peak bei 516 m	519			18,20		
Tonstein, grau, Gips, wenig Anhydrit	522			3,00		
<i>Grenzdolomit</i> (Unterer Keuper)						
Dolomit, hellbraun, sporadisch Gips und Anhydrit	525			3,00		
<i>Estherienschiefer</i> (Unterer Keuper)						
Mergel, braun- und dunkelgrau, fein geschichtet, bituminös, Dolomit- und Dolomitmergellagen, sporadisch Gips und Anhydrit	528			3,00		
<i>Trigonodusdolomit</i> (Oberer Muschelkalk)						
Dolomit, hellbraun, Silexe, kaver- nös, z. T. oolithisch (536,5 bis 537,5 m), Klüfte mit Calcit, tekto- nische Störungen mit Reibungs- flächen bei 534–537,5 m, Schicht- fallen 5–8°	539			11,00		
<i>Plattenkalke</i> (Oberer Muschelkalk)						
Kalk, hellbeigegrau, oben z. T. dolomitisch und oolithisch (bis 540 m), Spülungsverluste ab 540 m	551			22,00		
<i>Trigonodusdolomit</i> (Oberer Muschelkalk)						
Dolomit, hellbraun, vereinzelte Ooide (ab 554 m), Spülungsverluste	555			4,00		

Tabelle 7 (Fortsetzung)

Bohrung MB	Tiefe der Untergrenze in m			Scheinbare Mächtigkeit in m		
	2	3	4	2	3	4
<i>Plattenkalke (Oberer Muschelkalk)</i>						
Kalke, braungrau, unten (ab 556 m)						
Mergellagen, Spülungsverluste . . .	580			25,00		
<i>Trochitenkalke</i>						
(Oberer Muschelkalk)						
Kalke, grau, z. T. trochitisch, bei						
Bohrtiefe 580,4 m artesischer						
Wasserauslauf, unten (ab 582,80 m)						
stark zerklüftet und kavernös	>584			>4,00		

3.2 *Trias*

3.21 Mittlerer Muschelkalk

Die ältesten erbohrten Schichten gehören zur Oberen Sulfatzone des Mittleren Muschelkalks (Fig. 5). In der ungefalteten Schichtenfolge des Tafeljuras und südlich des Faltenjuras im Untergrund des Molassebeckens findet sich unter der Oberen Sulfatzone das Steinsalzlager. Der hohe Natrium-Chlorid-Gehalt des Mineralwassers Lostorf 2 (Bohrung 1) weist darauf hin, daß der Mittlere Muschelkalk hier oder weiter südlich noch Steinsalz enthält. Über dem Niveau der als Gleithorizont wirkenden und dabei entfernten Salz-Zone sind die Jurafalten entstanden, die durch Aufschiebungen einen komplexen Bau erhielten (Fig. 2 und 3).

Nach oben schließt der Mittlere Muschelkalk mit seiner Dolomit-Zone ab (Fig. 5), welche die Bohrung 3 im Dottenberg-Südschenkel auf 15 m durchfuhr: Bei einer Schichtneigung von 55° ergibt sich eine wahre Mächtigkeit der Dolomit-Zone von etwa 9 m, was gut mit der aus dem Gebiet bei Zeglingen und Kienberg bekannten Mächtigkeit von 10 bis 12 m (MERKI 1961) übereinstimmt.

Die Mächtigkeit des in die Faltung einbezogenen Teils des Mittleren Muschelkalks beträgt 70–80 m (BUXTORF 1916). Davon sind im Dottenberg-Südschenkel bei Bohrung 3 zwischen 346 und 393 m Tiefe insgesamt etwa 27 m (wahre Mächtigkeit bei 55° Schichtneigung) aufgeschoben (Fig. 2).

3.22 Trochitenkalke

Im Dottenberg-Südschenkel (Bohrung 3) beginnen die Trochitenkalke über der Dolomit-Zone des Mittleren Muschelkalks mit trochitischen und schwach oolithischen¹⁰ Kalken. Der im Norden längst des Rheins gut ausgebildete Basaloolith (MERKI 1961, GSELL 1968) ist somit auch hier angedeutet.

Höher sind die Kalke nur partienweise trochitisch. Sie schließen aber mit einer trochitischen Bank ab, die Stielglieder der Seelilie *Encrinus liliiformis* enthält und über welcher der basale Mergelhorizont der Plattenkalke folgt.

Von der Obergrenze des Mittleren Muschelkalks bis zur Untergrenze jenes Mergelhorizonts sind die Trochitenkalke auf 30 m erbohrt worden, was eine wahre Schichtmächtigkeit von 17 m ergibt. Dies sind 4–7 m weniger, als MERKI (1961) und GSELL (1968) für die Trochitenkalke des vorliegenden Gebiets angeben. Die Differenz besteht offenbar darin, daß die unteren Plattenkalke in unserem Profil zwei Mergelhorizonte enthalten und lithostratigraphisch der tiefere dieser beiden Horizonte als Basis der Plattenkalke betrachtet werden muß, währenddem der basale Mergelhorizont von MERKI im vorliegenden Gebiet erst dem höheren Mergel unseres Profils entsprechen dürfte.

Im Leutschenberg-Südschenkel sind nur die obersten 5 m der Trochitenkalke erbohrt.

3.23 Plattenkalke

Mit einem tieferen von zwei Mergelhorizonten lassen wir, wie erwähnt, die Plattenkalke beginnen. Der höhere Mergelhorizont liegt 3 m darüber (wahre Schichtmächtigkeit). Für die basalen Mergel der Plattenkalke ist der schon von GSELL (1968) erwähnte Glaukonit¹¹-Gehalt bezeichnend.

Nach oben schließen die Plattenkalke mit einer auf 2 m erbohrten, d.h. etwa 1 m mächtigen kalkig-dolomitischen und schwach oolithischen Bank ab, die ein weiterer Leithorizont ist (MERKI 1961, GSELL 1968). Vom basalen Mergelhorizont bis zu jener Bank wurden die Plattenkalke im Dottenberg-Südschenkel auf 38 m angetroffen, was eine wahre Mächtigkeit von 22 m ergibt. Gesamthaft entspricht die ermittelte wahre Mächtigkeit des in Trochitenkalke und Plattenkalke gegliederten Hauptmuschelkalks von 39 bis 40 m den Angaben von MERKI (1961) und GSELL (1968).

In dem mit Bohrung 3 zuunterst aufgeschlossenen Leutschenberg-Südschenkel ließ sich der Hauptmuschelkalk wegen tektonischer Störungen nicht gleichermaßen gut wie im Dottenberg-Südschenkel gliedern. Doch waren auch hier in den unteren Plattenkalken die bezeichnenden Mergellagen zu erkennen. Von dem in eine tektonische Störung einbezogenen Trigonodusdolomit nach unten bis zu den ersten trochitischen Bänken

¹⁰ Oolith, oolithisch = Gestein aus kleinen Kügelchen (Ooiden) zusammengesetzt.

¹¹ Mineral, wasserhaltiges Kalium-Eisen-Aluminium-Silikat, hier in Form von Körnern.

beträgt die erbohrte Mächtigkeit der Plattenkalke 25 m; sie kann wegen der tektonischen Störung oder der nicht präzis festzulegenden Untergrenze etwas größer als die wahre Mächtigkeit sein.

3.24 Trigonodusdolomit

Über der obersten Bank der Plattenkalke sind im Dottenberg-Südschenkel auch noch die darüber folgenden Dolomite auf 1 m oolithisch. Dieser Leithorizont des basalen Trigonodusdolomits ist in zwei mit der Bohrung 3 durchfahrenen Schuppen des Leutschenberg-Südschenkels ebenfalls ange troffen worden, in der höheren dieser Schuppen auch der liegende oolitische Kalk im Dach der Plattenkalke.

Für die Trigonodusdolomite sind im übrigen Silex¹²-Lagen bezeichnend.

Die gesamte Bohrtiefe in den Trigonodusdolomiten des Dottenberg-Südschenkels betrug 31 m, was eine wahre Schichtmächtigkeit von 18 m ergibt, d.h. einige Meter weniger als die von GSELL (1968) angegebene Mächtigkeit von 20 bis 22 m.

3.25 Unterer Keuper

Der Untere Keuper («Lettenkohle») ist, wie wir dies auch an anderen Orten beobachtet haben, auf kurze Strecken stark wechselnd ausgebildet. Mit den Bohrungen 2, 3 und 4 wurde er im Dottenberg-Südschenkel auf 6,05 m, 5,90 m und 4,90 m durchfahren, was eine wahre Mächtigkeit von etwa 3 bis 3,5 m ergibt. Im Kern der Hauenstein-Antiklinale ist der Untere Keuper auf 9 m erbohrt worden. Die wahre Schichtmächtigkeit lässt sich hier nicht ermitteln; doch dürfte sie auch nicht mehr als 3–3,5 m betragen, was darauf hinweist, daß die Schichtneigung gegen 70° beträgt. In einer der Schuppen des Leutschenberg-Südschenkels betrug die Bohrtiefe im Unteren Keuper 6 m, was ebenfalls wegen der Schichtneigung mehr als die wahre Mächtigkeit sein dürfte.

Im Dottenberg-Südschenkel bilden 0,2 m eines dolomitischen «Hard grounds», mit Schill¹³ Bonebed¹⁴ und Pyrit¹⁵ die Basis des Unteren Keupers und entsprechen wahrscheinlich dem weiter östlich, z.B. im Tafeljura zwischen Aare und Rhein, ausscheidbaren Unteren (Liegenden) Dolomit des Unteren Keupers.

Die Estherienschiefer,¹⁶ welche sowohl im Dottenberg-Südschenkel als auch im Kern der Hauenstein-Antiklinale Peaks der Gamma-Strahlung ergaben, umfassen, auf wahre Mächtigkeit bezogen, etwa 1–2 m, der dar

¹² Feuerstein, Kieselsäure-Konkretionen.

¹³ Anhäufung von Schalen oder Schalenbruchstücken von Organismen.

¹⁴ Anhäufung von Wirbeltierknochen und -zähnen.

¹⁵ Schwefelkies, FeS_2 .

¹⁶ Nach der Muschel-Gattung *Estheria* benannte Formation.

über folgende Grenzdolomit etwa 1,5–2 m, und, da die Anteile unterschiedlich sind, beide Schichten zusammen, wie erwähnt, 3–3,5 m. Der für die grauen bis schwarzen dolomitischen Mergel der Estherienschiefer bezeichnende Bitumengehalt kommt im beige-grauen, zum Teil fein gebänderten Grenzdolomit auf millimeterdünnen Schichten ebenfalls vor, in beiden Schichtgliedern des Unteren Keupers auf feinen Klüften auch Gips; im Grenzdolomit hat es zudem Lagen von Gips und Anhydrit.

3.26 Gipskeuper

Über dem Grenzdolomit beginnt mit eindeutig festlegbarer Untergrenze der Gipskeuper. Dessen Obergrenze wäre lithostratigraphisch im Prinzip dort gegeben, wo der Gipsgehalt aufhört und feinsandige Mergel einsetzen, aber im vorliegenden Falle allein mit diesen Kriterien nicht eindeutig definiert, weshalb gestützt auf weitere lithostratigraphische Merkmale bei der Besprechung der Schilfsandsteingruppe noch darauf zurückzukommen sein wird.

Der Gipskeuper des *Dottenberg-Südschenkels* lässt sich in den Bohrungen 1, 2 und 3 mit mehreren Leithorizonten von oben nach unten wie folgt gliedern:

Tabelle 8

Gliederung des Gipskeupers von Bad Lostorf (Dottenberg-Südschenkel)

Wahre Mächtigkeiten		
(9)	13 – 12,5 m	Bunte Mergel und Tonsteine mit unterschiedlichem, meist geringem Gipsgehalt, teilweise schwach bituminös, Dolomit- und Dolomitmergellagen, breites Gamma-Strahlungs-Hoch in der unteren Hälfte.
(8)	6,5 – 7,5 m	Gips in Bänken von 3–5 m Lagen von bunten Mergeln.
(7)	0,5 – 1 m	Gips mit schwach bituminösen Mergeln oder dunkle gipsführende Tonsteine, Gamma-Ray-Peak.
(6)	27 – 23 m	Bunte Tonsteine mit Gips (z.T. in Bänken).
(5)	47 – 48 m	Bunte Tonsteine und Mergel mit Gips (ohne bedeutende Bänke), vereinzelte dolomitische Lagen.
(4)	0 – 1 m	Graue Tonsteine mit Lagen von hellbraunen Dolomiten und mit Gips.
(3)	0,5 – 0,5 m	Dunkle, schwach bituminöse Tonsteine, zum Teil mit Gips und Anhydrit, zum Teil mit Dolomit, Schalenabdrücke.
(2)	0 – 1 m	Tonstein mit Gips.
(1)	1,5 – 2,5 m	Dunkelbraungrauer, z.T. fein gebänderter Anhydrit mit Dolomitmergeln und schwach bituminösen Tonstein-Lagen, Gamma-Ray-Peak.

Die mittlere wahre Gesamtmächtigkeit beträgt bei einer zu 55° angenommenen Schichtneigung 97 m. Über den Basis-Schichten ist das Calcium-Sulfat vorwiegend als Gips und nur wenig als Anhydrit vorhanden.

Im Kern der *Hauenstein-Antiklinale* ist der Basis-Anhydrit, Schicht (9), ebenfalls vorhanden. Das im Dottenberg-Südschenkel 3 m über der Untergrenze des Gipskeupers (scheinbare Mächtigkeit, wahre Mächtigkeit = 1,7 m) im Bereich der Anhydritbank beobachtete Gamma-Ray-Peak trat hier im hangenden gipsführenden Tonstein zweigipflig 6–8 m (scheinbare Mächtigkeit, mutmaßliche wahre Mächtigkeit bei 65° Schichtneigung = 2,5–3 m) über der Gipskeuper-Untergrenze auf. Über dem Basis-Anhydrit und unter der Dottenberg-Aufschiebung sind bei Bohrung 3 nur noch auf 19 m Bohrlänge (scheinbare Mächtigkeit) bunte Tonsteine mit viel Gips erhalten.

Im Gipskeuper des *Leutschenberg-Südschenkels* finden sich nur noch teilweise Analogien zum Profil des Dottenberg-Südschenkels:

Anstelle des 3 m mächtigen Basis-Anhydrits, Schicht (1), finden wir hier über der Untergrenze des Gipskeupers einen grauen Tonstein mit Gips und wenig Anhydrit. Im hangenden, wenig Gips und Anhydrit führenden Tonstein manifestiert sich aber wiederum ein Gamma-Ray-Peak, hier etwa 6 m über der Gipskeuper-Untergrenze. Die höheren Schichten zeigen zunächst eine namentlich auch nach den Gipsanteilen vom Dottenberg-Südschenkel abweichende Gliederung. Eine größere Gipsbank von 4 m findet sich dann 74–78 m über der Gipskeuper-Untergrenze, wo nach der wahren Mächtigkeit (Untergrenze bei 76–77 m) auch im Profil des Dottenberg-Südschenkels ein Horizont ausscheidbar ist, für den 3–5 m mächtige Gipsbänke bezeichnend sind. Schließlich kommt eine dolomitführende Tonstein-Serie ab 84 m über der Gipskeuper-Untergrenze mit einem Gamma-Ray-Hoch bei 87–92 m über dieser Grenze vor, währenddem eine lithologisch vergleichbare Serie im Profil des Dottenberg-Südschenkels durchschnittlich etwa 85 m über der Gipskeuper-Untergrenze einsetzt und ein Gamma-Ray-Hoch bei etwa 87–91 m über dieser Grenze hat (wahre Schichtmächtigkeiten). Die Gipskeuper-Serie des Leutschenberg-Südschenkels ist 93 m über ihrer Untergrenze durch die Aufschiebungsfläche einer Schuppe abgeschnitten. Aus dem Profil des Dottenberg-Südschenkels kann jedoch geschlossen werden, daß nur wenige Meter des allerobersten Gipskeupers fehlen.

Für den 2 km westlich der Bohrungen verlaufenden Hauensteinbasistunnel sind im Übersichtsprofil der Schichtenfolge (BUXTORF 1917) etwa 98 m Gipskeuper enthalten. Rund 8 km östlich gibt PRASAD (1974) für die beiden Gipskeuper-Profil des Belchentunnels 74,5 und 111 m, im Mittel somit 93 m an, wobei die Mächtigkeit des nördlichen Profils von 74,5 m durch tektonische Deformationen reduziert ist.

Zwischen Bad Lostorf und dem Belchentunnel ist der Gipskeuper somit konstant etwa 100 m mächtig. Die Gliederung des Gipskeupers im

Belchentunnel (PRASAD 1974) läßt sich jedoch nicht auf die Bohrprofile von Bad Lostorf übertragen, was darauf hinweist, daß die Sedimentationsbedingungen und offenbar auch die diagenetischen Vorgänge örtlich stark wechselten.

3.27 Untere bunte Mergel- und Schilfsandsteingruppe

Die Schilfsandsteingruppe, welche 2 km westlich im Hauensteinbasistunnel unter bunten sandigen Mergeln mit spärlichen Dolomiten an der Basis auch einen Mergelsandstein mit verkohlten Pflanzenresten enthält (BUXTORF 1917), kommt in den Bohrungen von Bad Lostorf nur in der «tonigen Stillwasser-Fazies» (WURSTER 1964), teilweise mit geringem Feinsandanteil, vor.

Wir lassen die Schilfsandsteingruppe des Dottenberg-Südschenkels mit einem etwa 1 m mächtigen schwarzen, bituminösen Mergel beginnen, dessen Untergrenze in Bohrungen 2 und 4 96–98 m über der Gipskeuper-Untergrenze liegt (wahre Schichtmächtigkeit) und dessen Horizont in Bohrung 3 bei 69–70 m Tiefe oder 98 m über der Gipskeuper-Untergrenze durch ein kleines Gamma-Ray-Peak ebenfalls angedeutet ist.

Die letzten Gipsspuren erweisen sich nicht als geeignetes Kriterium zur Grenzziehung zwischen Gipskeuper und Schilfsandsteingruppe. In Bohrung 4 hören sie zwar gerade unter dem erwähnten Leithorizont 96 m über der Gipskeuper-Untergrenze auf; in Bohrung 2 gehen sie aber stratigraphisch noch etwa 7 m höher, und in Bohrung 3 setzen sie schon 9 m tiefer aus. Auch der Beginn eines erkennbaren Feinsandanteils in den Mergeln und Tonsteinen ist nicht als Kriterium einer präzisen Grenzziehung geeignet. Ein sehr geringer Feinsandanteil war in Bohrung 4 noch bis etwa 1,5 m und in Bohrung 3 bis etwa 4,5 m unter dem von uns als Basis der Schilfsandsteingruppe gewählten Leithorizont zu erkennen, währenddem er in Bohrung 2 erst etwa 6 m über dessen Untergrenze einsetzt (wahre Schichtmächtigkeiten).

Die Unteren bunten Mergel, welche über dem Schilfsandstein ausscheidbar sind, wenn dieser in der sandigen Fazies ausgebildet ist, lassen sich in den Profilen von Bad Lostorf lithologisch nicht von der Schilfsandsteingruppe abtrennen und werden deshalb mit dieser zusammengefaßt.

Die Untere bunte Mergel-Schilfsandsteingruppe besteht aus vorwiegend grauen, meist etwas feinsandigen Mergeln mit einzelnen Dolomitmergel-lagen. Etwa 2 m über dem basalen Leithorizont findet sich eine weitere bituminöse Lage, die im Gamma-Ray-Log durch einen besonders markanten Peak zum Ausdruck kommt. In den Bohrungen 3 und 4 entspricht die 13–15 m betragende Bohrlänge der Unteren bunten Mergel- und Schilfsandsteingruppe bei einer Schichtneigung von 55° einer wahren Schichtmächtigkeit von 7,5 bis 8,5 m. Die in Bohrung 2 in der Vertikalen durchfahrenen 28 m dürften unter der hangenden Störung einer tektonisch be-

dingten Anhäufung entsprechen, wobei allerdings die obersten 7 m nicht sicher stratigraphisch zuzuordnen sind.

Im Leutschenberg-Südschenkel schneidet die aufgeschobene Hauenstein-Antiklinale die Untere bunte Mergel- und Schilfsandsteingruppe nach oben ab, weshalb über dem Gipskeuper nur 5 m erbohrt wurden. In diesem Rest ist aber der markante Gamma-Ray-Peak der Schilfsandsteingruppe enthalten.

3.28 Hauptsteinmergel und Obere bunte Mergel

Über der Unteren bunten Mergel-Schilfsandsteingruppe bilden die Hauptsteinmergel, auch «Gansingerdolomit» genannt, mit ihren rotbraunen und roten Mergeln und Dolomitmergellagen einen Leithorizont. Seine mit 55° Schichtneigung ermittelte wahre Mächtigkeit beträgt nur 2–2,5 m.

Für die darüber folgenden Oberen bunten Mergel ergibt sich unter der gleichen Annahme eine wahre Schichtmächtigkeit von etwa 4 m in Bohrung 3 und von 7,5 m in Bohrung 4. In Bohrung 2 sind Hauptsteinmergel und Obere bunte Mergel durch eine Störung abgeschnitten, in der Bohrung 3 die Oberen bunten Mergel durch dieselbe Störung jedenfalls tektonisch reduziert.

Im Vergleich zum 2 km westlich verlaufenden Hauensteinbasistunnel, wo dem Schichtenprofil (BUXTORF 1917) etwa 15 m Schilfsandsteingruppe, etwa 10 m Hauptsteinmergel und etwa 22 m Obere bunte Mergel entnommen werden können, sind die aus den Bohrprofilen von Lostorf ermittelten Mächtigkeiten gering. Für die Oberen bunten Mergel des vorliegenden Faltenjuraabschnitts erwähnt aber schon GSELL (1968), daß sie die Stärke von 10 m kaum überschreiten dürften. Möglicherweise zeichnet sich hier ein Gebiet mit reduzierten Schichtmächtigkeiten ab, das im Süden seine Fortsetzung haben kann, wo die Bohrung Pfaffnau 1 (BÜCHI et al. 1965) auch verhältnismäßig geringe Mächtigkeiten von 9 m im Schilfsandstein-Bereich und 13 m im hangenden Teil des Mittelkeupers angetroffen hat. Indessen sind in den Bohrungen von Bad Lostorf tektonische Reduktionen dieser Schicht-Serien nicht sicher auszuschließen.

Der Obere Keuper (Rhät) fehlt im vorliegenden Gebiet.

3.3 Jura

3.31 Lias

In den Bohrungen 3 und 4 folgen über den Oberen bunten Mergeln des Keupers auf je 5 m Bohrlänge Kalke mit Kalkmergellagen und mit Belemniten- und Crinoidenfragmenten.¹⁷ Der Wechsel von den Mergeln des Keu-

¹⁷ Belemniten = fossile Weichtiere mit kegelförmiger innerer Schale. Crinoiden = Seelilien.

pers und eventuell des alleruntersten Lias zu den Lias-Kalken manifestiert sich auch in einer Abnahme der Gamma-Strahlung. Die Kalke sind nach ihrer Lithologie und ihrem Fossilgehalt den Arietenkalken, zum Teil ebenfalls auch noch den liegenden Angulatenschichten des Unteren Lias zuzuordnen. Ihre wahre Mächtigkeit beträgt unter Annahme einer Schichtneigung von 55° gegen 3 m. Die zwischen Oberen bunten Mergeln und Angulatenschichten-Arietenkalken eingeschalteten, in vorliegendem Gebiet in jedem Falle nur sehr geringmächtigen Insektenmergel konnten im Bohrgut nicht näher abgegrenzt werden. In Bohrung 2 dürften die 10 m Bohrlänge in den Kalken des Unteren Lias eine wegen der unmittelbaren Nähe einer Störung viel zu große Schichtmächtigkeit vortäuschen.

Die über den Arietenkalken folgenden Lias-Schichten des Dottenberg-Südschenkels sind im Gebiet der Bohrungen 2–4 durch die Gleitfläche des Falkensteinpakets oder durch die dieser Rückgleitung vorangegangene Erosion abgeschnitten.

3.32 Dogger

Die obersten erbohrten Schichten gehören tektonisch zum Leutschenberg-Südschenkel, sind aber als Falkensteinpaket über den Dottenberg-Südschenkel zurückgeglitten. Über der Rückgleitungsfläche (Fig. 2) folgen zunächst Mergel und Mergelkalke der Blagdeni-Schichten¹⁸ und dann die oolithischen Kalke des Unteren Hauptrogensteins, welche im Übergang von den Blagdeni-Schichten noch Mergelzwischenlagen enthalten und damit die Unteren Acuminata-Schichten andeuten, die sich im Bohrgut indessen nicht eindeutig abgrenzen ließen.

Zu den Blagdeni-Schichten des Falkenstein-Gleitpakets zählen wir auch die in Bohrung 1 von 12 m bis zur Endteufe von 25 m wechsellagernden Mergel und Mergelkalke.

Mit den untersten 20 m des Unteren Hauptrogensteins (inklusive Untere Acuminata-Schichten) endet der Bereich der durch die Bohrungen in Bad Lostorf erschlossenen, im Mittleren Muschelkalk beginnenden Schichtenfolge. In den Bohrungen ist allerdings wegen der tektonischen Dislokationen von dem über den Arietenkalken folgenden Lias bis zum erbohrten oberen Teil der Blagdeni-Schichten eine Schichtenfolge nicht erbohrt worden, deren Mächtigkeit nach dem Schichtenprofil des Hauensteinbasistunnels (BUXTORF 1917) etwa 185 m beträgt.

¹⁸ Nach dem Fossil «*Ammonites*» *blagdeni* benannte Formation.

Figur 5
Übersicht der Schichtenfolge

System		Formation		
		Serie		
		mittl.	Unterer Hauptrogenstein Untere Acuminataschichten	
		40m	Blagdeni - Schichten	
		40m	Humphriesi - Schichten Sauzei - Schichten Sowerbyi - Schichten Murchisonae - Schichten	
		100m	Opalinustone	
		35m	Lias	
		10m	Obere bunte Mergel	
		8m	Untere bunte Mergel- und Schilfsandsteingruppe	
		97m	Gipskeuper	
Triassic	Muschelkalk	unterer mittlerer	3-4 m Grenzdolomit + Estherienschiefer	
		18m	Trigonodusdolomit	
		22m	Plattenkalke	
		17m	Trochitenkalke	
		9m	Dolomit - Zone	
			Obere Sulfat - Zone	
			Steinsalz - Zone	
				Bohrprofile Lostorf

4. Mineralwasser Lostorf 2

4.1 Fassung (Bohrung 1)

Die 1969 zur Neufassung des Mineralwassers Lostorf 2 angesetzte Brunnenbohrung \varnothing 520 mm durchfuhr unter dem die Sohle des früheren Schachtes 1,6 m hoch bedeckenden Schutt von 12,0 m bis 25,0 m (ab Ansatzpunkt) wechseltlagernde Mergel und Mergelkalke der Blagdeni-Schichten. Der Zutritt des Wassers erfolgt seit dem Ausbau der Bohrung durch das von 12,0 bis 22,0 m eingebaute und mit einem Kunststoffüberzug versehene Schlitzbrückenfilter \varnothing 400 mm. Das in der Bohrung belassene, bis 12,5 m unter die Felsoberfläche eingebundene Stahlbohrrohr und das darin einzementierte, mit Kunststoff überzogene Vollrohr verhindern, daß in den neuen Brunnen direkt Wasser aus dem Bereich des ehemaligen Schachtes eindringt. Dessen Zementrohrwandung \varnothing 100 cm war seit 1912 durch das sulfat- und schwefelwasserstoffhaltige Wasser derart zerstört worden, daß sie nur noch durch den hydrostatischen Druck des Wassers überhaupt hielt und einstürzte, als der Wasserspiegel durch Pumpen abgesenkt wurde.

4.2 Schichtung des Wassers

Proben, die während des Abteufens der Bohrung von der jeweiligen Bohrlochsohle mit einer Ruttnerschen Schöpfflasche entnommen wurden, nachdem das Bohrwasser am Vorabend mit Druckluft ausgeblasen worden war, ergaben unter einem mineralarmen Wasser die höchsten Mineralisationen mit 11,0–12,2 mval/l Gesamthärte, 1169–1491 mg/l Chloriden und 30,3 bis 43,8 mg/l Schwefelwasserstoffgehalt zwischen 13,80 m und 17,50 m Bohrtiefe.

Am 2. Oktober 1969 ergab eine Aufnahme der Temperatur- und Schwefelwasserstoff-Schichtung im oberen Teil der Wassersäule nur Schwefelwasserstoff-Gehalte bis 2,9 mg/l. Zwischen 12,35 m und 14,35 m stieg der Schwefelwasserstoff-Gehalt sprunghaft von 4,6 mg/l auf 30,1 mg/l und dann kontinuierlich bis 20,35 m auf 46,5 mg/l an. Das gehaltvollste Wasser mit 128–141 mg/l Schwefelwasserstoff fand sich jedoch zugleich mit der höchsten Temperatur von 14,4° C erst knapp unter der bei 22 m endenden Filterrohrstrecke.

Nach den beiden Untersuchungen ist anzunehmen, daß das Mineralwasser ab etwa 13,80 m Tiefe in den Brunnen eintritt. Im ruhenden, weder artesisch überlaufenden noch durch Pumpen gestörten Brunnen sammelt sich offenbar das am stärksten mineralisierte Wasser wegen seiner trotz erhöhter Temperatur größten Dichte über der Sohle an.

4.3 Abhängigkeit der Druckhöhen von den Niederschagen

4.31 Schwankungen der Druckhöhen (Wasserspiegel und artesischer Überlauf)

Beobachtungen in den Jahren 1970–1973 zeigten, daß der Wasserspiegel nicht immer unter dem Niveau des Brunnenkopfs liegt, sondern daß das Wasser zeitweilen am Brunnenkopf artesisch überläuft. Ende April 1970 hatte nach einem nassen Winter und Frühjahr nicht nur der neue Brunnen (Bohrung 1) einen artesischen Überlauf. Auch aus dem 1864/65 erstellten, bei der Neufassung von 1912 versiegten alten Stollen (vgl. Ziff. 1.1) trat wieder schwefelwasserstoffhaltiges Wasser aus.

Messungen der artesisch überlaufenden Wassermenge und, bei fehlendem artesischem Überlauf, der Lage des Wasserspiegels ergaben 1972 und 1973 eine kurzfristige Abhängigkeit der Druckhöhe von den örtlichen Niederschagen.

Zum Beispiel flossen zu Beginn des Pumpversuchs (vgl. Ziff. 4.42) vom Juni 1972 70 l/min Wasser am Brunnenkopf über. Doch schon drei Tage mit sehr wenig oder keinem Regen bewirkten, daß der Wasserspiegel bei einer Entnahme von nur 9 l/min unter das Niveau des Brunnenkopfs fiel. Zwei Regentage brachten erneut einen artesischen Überlauf, währenddem später eine längere Trockenperiode diesen beendete und auch ohne Pumpbetrieb den Wasserspiegel bis 0,81 m unter Brunnenkopf absenken ließ.

Die kurzfristige Abhängigkeit der Druckhöhe von den örtlichen Niederschagen ergab sich vor allem aus den im April und Mai 1973 meistens täglich ein- bis zweimaligen Messungen (Figur 6). Nach starken Niederschagen stieg der Wasserspiegel oder die Menge des artesischen Auslaufs an. Wenn keine oder nur geringe Niederschage fielen, sank der Wasserspiegel oder die auslaufende Wassermenge dagegen ab.

4.32 Statistische Prüfungen kurzfristiger Abhängigkeiten

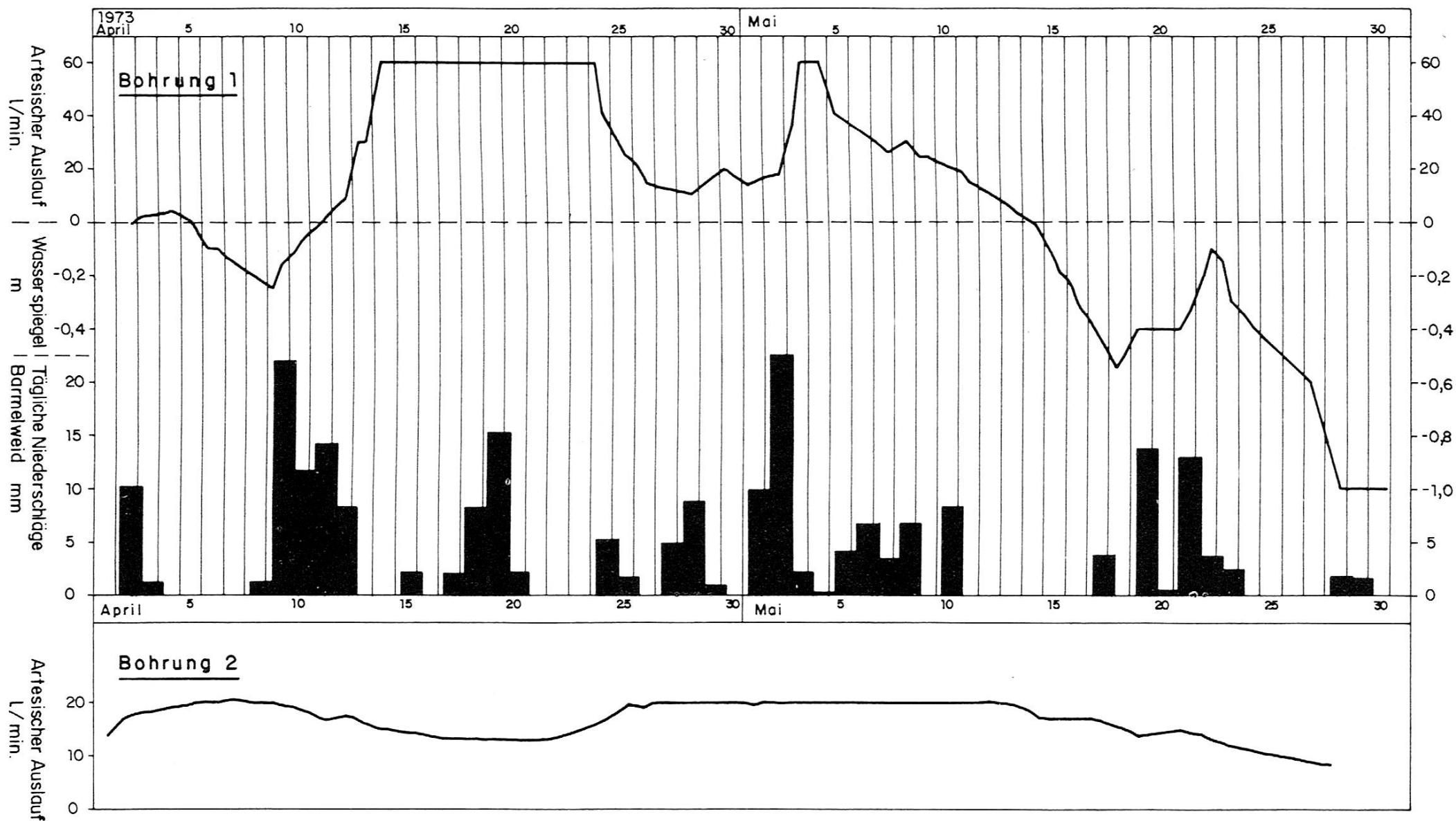
Näherungsweise kann nach den bisherigen Beobachtungen für den in Betracht fallenden Schwankungsbereich angenommen werden, daß eine Zunahme des artesischen Auslaufs um einen Liter pro Minute einer Zunahme der Druckhöhe von etwa einem Zentimeter entspricht.

Die Abhängigkeit der kurzfristigen Veränderungen der artesischen Auslaufmengen und, bei fehlendem artesischem Überlauf, der Wasserspiegel von den Niederschlagsmengen haben wir für die Perioden vom 15. Juni 1972 bis 13. Juli 1972 und vom 7. April 1973 bis 28. Mai 1973 nach Methoden der mathematischen Statistik untersucht. Dabei ließen wir für die letztere Periode die Zeit vom 14. bis 23. April 1973 unberücksichtigt, in welcher der artesische Ausfluß keine Veränderung zeigte, sondern konstant bei 60 l/min blieb.

Figur 6

Bohrung 1 (Mineralwasser 2) und Bohrung 2 (Mineralwasser 3a)

Druckhöhen und Niederschläge April-Mai 1973



Mit der statistischen Prüfung untersuchten wir die Abhängigkeit der Werte:

- ΔQ = Veränderung der Schüttung, d. h. des artesischen Auslaufs und, in der ersten Periode, der mit der Pumpe geförderten Wassermenge,
- ΔH = Veränderung des Wasserspiegels im Brunnen bei fehlendem artesischem Auslauf, und
- $\Delta Q, H$ = Veränderung der Druckhöhe unter der Annahme, daß eine Veränderung der Schüttung um einen Liter pro Minute einer Veränderung des Wasserspiegels um einen Zentimeter entspricht (Mischwerte, wenn in der gewählten Zeitspanne ein Wechsel von einem artesischen Überlauf zu einem unter Brunnenkopf liegenden Wasserspiegel oder umgekehrt stattfand),

von:

- ΣR = Summe der Niederschlagsmenge bei der etwa 4 km entfernten Meßstation Barmelweid in der Zeit der betrachteten Veränderung ΔQ , ΔH und $\Delta Q, H$.

Als Zeitspannen der Veränderung wählten wir $T = 5$ Tage, wobei die verglichenen Werte meistens um etwa 8 Uhr gemessen oder, bei starken zeitlichen Abweichungen der Messungen, auf diesen Termin interpoliert worden sind. Die Niederschlagssummen beziehen sich auf die gleichen Zeitspannen jeweils von 7 bis 7 Uhr.

Aus der zweiten Periode (1973) sind genügend Werte-Paare vorhanden, um die Abhängigkeit von ΔQ (21 Werte) und von ΔH (12 Werte) von den Niederschlagsmengen ΣR getrennt untersuchen zu können. Dabei ergaben sich für die 5tägigen Zeitspannen sehr ähnliche Regressionsbeziehungen:

$$\begin{aligned}\Delta Q \text{ (l/min)} &= 1,98 \cdot \Sigma R - 53,4, \\ \Delta H \text{ (cm)} &= 2,19 \cdot \Sigma R - 54,5.\end{aligned}$$

Im einen Falle würde in 5 Tagen die Schüttung um 53,4 l/min abnehmen, im anderen Falle der Wasserspiegel um 54,5 cm sinken, wenn während dieser 5 Tage keine Niederschläge gefallen sind. Oder die Schüttung würde bei einer Niederschlagsmenge von 27 mm/5 d und der Wasserspiegel bei einer solchen von 25 mm/5 d unverändert bleiben. Die Ähnlichkeit der Beziehungen, welche nach dem Student-t-Test beide statistisch hoch gesichert sind, bestätigt, daß l/min und cm näherungsweise einander gleichgesetzt werden können. Mit allen 42 Werten von ΔQ , ΔH und $\Delta Q, H$ erhalten wir die ebenfalls statistisch hoch gesicherte Beziehung (Sicherheitsgrad I für t-Verteilung mit $N-2$ Freiheitsgraden $\sim 1,000\,000$):

$$\Delta Q \text{ (l/min)} \cong \Delta H \text{ (cm)} \cong \Delta Q, H = 1,75 \cdot \Sigma R - 47,6.$$

Danach fällt die Schüttung im Mittel um rund 48 l/min oder der Wasserspiegel um rund 48 cm in 5 Tagen, wenn während dieser Zeit keine Niederschläge gefallen sind. Schüttung oder Wasserspiegel bleiben im Mittel unverändert, wenn in 5 Tagen gerade 27 mm Niederschläge gefallen sind. Die Veränderungen der Schüttung oder der Wasserspiegel lassen sich zu 75 % statistisch (Bestimmtheitsmaß B) aus den Niederschlagsmengen erklären.

Aus der ersten Periode (1972) stehen nicht genügend reine Werte von ΔQ für eine statistische Untersuchung zur Verfügung, und die Abhängigkeit allein der 10 Werte von ΔH ist nicht ausreichend statistisch gesichert. Für die Gesamtheit aller 27 Wertepaare mit ΔQ , ΔH und $\Delta Q, H$ erhalten wir jedoch die statistisch hoch gesicherte Beziehung (Sicherheitsgrad I für t-Verteilung mit N-2 Freiheitsgraden $\sim 1,000000$):

$$\Delta Q = \Delta H = \Delta Q, H = 1,44 \cdot \Sigma R - 55,6.$$

Wenn in 5 Tagen keine Niederschläge fallen, ging danach die Schüttung durchschnittlich um rund 56 l/min oder der Wasserspiegel um rund 56 cm zurück, also um ähnliche Beträge wie in der zweiten untersuchten Periode (48 l/min, 48 cm). Nach der statistischen Beziehung brauchte es mit rund 39 mm/5 d aber mehr Niederschläge als in der zweiten Periode (27 mm/5 d), damit Schüttung oder Wasserspiegel nicht zurückgehen. Die mittlere Niederschlagsmenge, welche statistisch für den Gleichgewichtszustand konstanter Schüttung oder Wasserspiegel notwendig ist, beträgt in der zweiten Periode 5,4 mm/d und in der ersten Periode 7,7 mm/d. Da die erste Periode (Juni/Juli 1972) in eine Jahreszeit mit hoher, die zweite Periode (April/Mai 1973) in eine solche mit eher niedriger Evapotranspiration¹⁹ und daher mit höherem Versickerungsanteil der Niederschläge fiel, kann der Unterschied real sein.

4.33 Jahreszeitliche Abhängigkeit

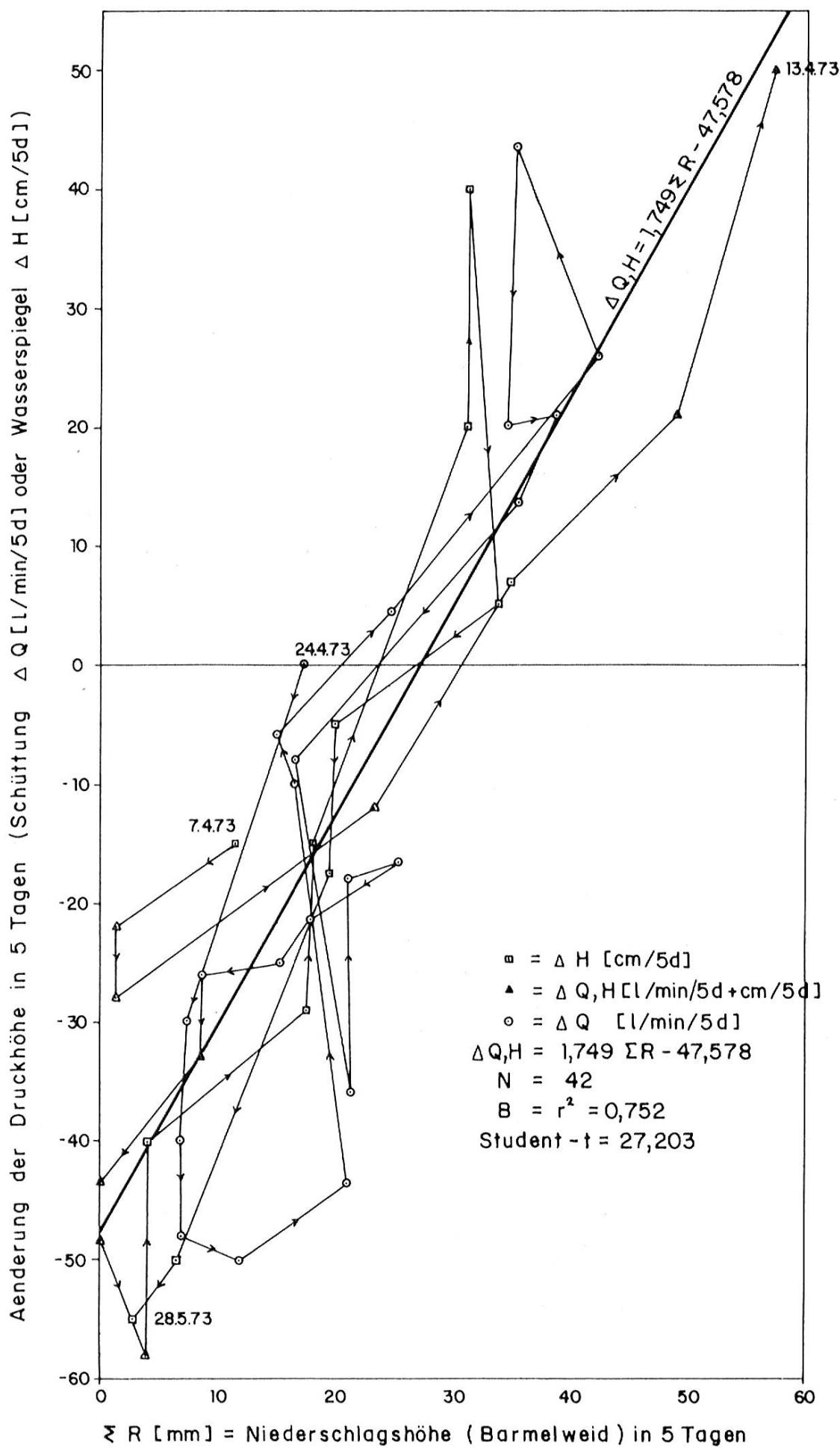
Vergleichsweise untersuchen wir noch die während längeren Zeiträumen jeweils bis zur Wiederkehr einer bestimmten Druckhöhe gefallenen Niederschläge. Im Winter 1971/72 (14. September 1971 – 22. März 1972) waren durchschnittlich 1,4 mm/d Niederschläge ausreichend, um den Wasserspiegel sogar um 22 cm ansteigen zu lassen. In den Monaten April–Juni der Jahre 1972 und 1973 waren in je 67tägigen Perioden zwischen dem Beginn eines ersten bis zum Beginn eines zweiten artesischen Auslaufs durchschnittlich 3,5 mm/d und 3,0 mm/d Niederschläge gefallen. Im Sommer (14. Mai 1973 – 23. Juli 1973) stiegen die bis zur Wiederkehr eines gleichen hydrostatischen Zustandes (je Ende des artesischen Auslaufs oder je 1,00 m Wasserspiegeltiefe bei fallendem Spiegel) gefallenen Nieder-

¹⁹ Gesamtverdunstung eines Gebietes (inkl. Transpiration der Pflanzen).

Figur 7

Bohrung 1 (Mineralwasser 2)

Abhängigkeit der Veränderung der Druckhöhe von den Niederschlägen, 7.-13. April 1973
und 24. April - 28. Mai 1973



schläge auf durchschnittlich 4,9–7,1 mm/d an. Vom 6. Juli 1973 bis 13. August 1973 genügten durchschnittlich 4,4 mm/d Niederschläge nicht, um ein Absinken des Wasserspiegels um 0,20 m unter den Ausgangswert zu verhindern.

Diese Befunde weisen darauf hin, daß ein hydrostatisches Gleichgewicht, wie zu erwarten, während des Sommers wegen der erhöhten Evapotranspiration größere Niederschlagsmengen als während des Winters verlangt. Oder mit anderen Worten: Eine gleiche Niederschlagsmenge kann im Winter einen Anstieg des hydrostatischen Niveaus bewirken, im Sommer aber dessen Fallen nicht verhindern.

Mit den sechs sich auf die Monate April bis August erstreckenden Perioden ergibt sich für die jeweils bis zur Wiederkehr eines gleichen oder ähnlichen hydrostatischen Zustandes gefallenen Niederschläge ein mittlerer Wert von 4,6 mm/d. Wenn wir diesen Wert für das Mittel der Sommermonate und den Wert von 1,4 mm/d für das Mittel der Wintermonate als repräsentativ betrachten, kann das gewogene Jahresmittel der Niederschläge, welche die Druckhöhe in dem durch die Schwankungen charakterisierten labilen Gleichgewicht halten, zu 3,0 mm/d geschätzt werden. Dieser Wert entspricht auch tatsächlich der mittleren Niederschlagsmenge (1901–1960) von 1105 mm/Jahr = 3,0 mm/d.

4.4. Pumpversuche

Vier Pumpversuche im Oktober 1969 dienten zur Abklärung der Ergiebigkeit der zum Brunnen ausgebauten Bohrung 1 und der Wasserbeschaffenheit bei großen Förderleistungen von 60 bis 300 l/min. Da schon im Vormonat wenig Niederschläge gefallen waren (Barmelweid 35 mm) und der Oktober selbst noch trockener war (10 mm), lag der Wasserspiegel am 6. Oktober 1969, vor Beginn der Pumpversuche, bei 1,37 m unter dem Brunnenkopf. Die einzelnen Pumpversuche dauerten je 48 Stunden und waren voneinander durch 120stündige Betriebsunterbrüche getrennt. Die jeweilen schon vor Pumpschluß konstanten Absenkungen betrugen bei Entnahmen von 60, 120 und 200 l/min 0,82, 0,77 und 1,37 m per l/min, bestätigen also, daß eine Entnahme von 1 l/min die Druckhöhe um etwa 1 cm vermindert.

Die mit gesteigerter Entnahme sinkende Mineralisation zeigte, daß der Anteil des aus der Tiefe aufsteigenden Wassers abnahm und die größeren Fördermengen vorwiegend aus einem sich mit dem Mineralwasser vermischtenden Grundwasser bestanden.

Nachdem die Bohrungen 2 und 3 Mineralwasser in einer für das neue Bad ausreichenden Menge erbracht hatten, konnte nur noch in Frage kommen, eventuell später das in Bohrung 1 gefäßte spezielle Mineralwasser mit möglichst hohen Mineral- und Schwefelwasserstoffgehalten zu nutzen.

Um diese Nutzungsart zu erproben, wurde die Pumpe im Juni 1972 während zweier Wochen konstant mit 9 l/min betrieben.

4.5 Chemische Beschaffenheit und Temperatur des Wassers

4.51 Beziehungen zwischen Chlorid-, Natrium- und Magnesium-Konzentrationen, Temperatur und Schwefelwasserstoffgehalt

Die Analysen aus der Zeit des Pumpversuchs vom 12. bis 29. Juni 1972 belegen wechselnde Mischungsverhältnisse des aus der Tiefe aufsteigenden Mineralwassers, für welches der hohe Gehalt an Chlorid- und Natrium-Ionen bezeichnend ist, mit Wässern anderer Herkunft. Die statistische Auswertung der Gesamtheit aller 15 Teilanalysen ergab hoch gesicherte Abhängigkeiten ($i > 0,999$) der Temperatur, der Natrium- und der Magnesium-Konzentrationen und des Schwefelwasserstoffgehalts von der Chlorid-Konzentration (Tabelle 9, Fig. 8 und 9).

Tabelle 9

Bohrung 1 (Mineralwasser 2).

Statistische Abhängigkeit der Temperatur, der Natrium- und der Magnesium-Konzentrationen und des Schwefelwasserstoffgehalts von der Chlorid-Konzentration

Statistische Regression*	Zahl der Werte N	Bestimmt- heitsmaß B = r ²	Student-t-Verteilung** Sicherheitsgrad I mit N-2 Freiheitsgraden
(Cl ⁻ in mval/l)			
t (°C) = 12,6 + 0,056 Cl ⁻	15	0,591	0,999185
Na ⁺ (mval/l) = 1,29 + 0,977 Cl ⁻	9	0,987	~1,000000
Mg ²⁺ (mval/l) = -0,01 + 0,102 Cl ⁻	15	0,962	~1,000000
H ₂ S (mmol/l) = -0,32 + 0,067 Cl ⁻	12	0,922	0,999999

* Formelmäßiger Zusammenhang zweier Merkmale (mathematisch-statistische Gesetzmäßigkeit).

** Mathematisch-statistischer Test zur Prüfung der statistischen Sicherheit, z. B. der Frage, ob die bei der Regressionsrechnung gefundene generelle Abhängigkeit zweier Eigenschaften trotz der Streuung der Werte gesichert oder nur zufällig ist. Wenn der Sicherheitsgrad I mehr als 0,99 beträgt, ist die Abhängigkeit gesichert.

Das Bestimmtheitsmaß besagt, daß sich rund 92–99 % der Veränderungen des Schwefelwasserstoffgehalts und der Magnesium- und der Natrium-Konzentrationen aus der Veränderung der Chlorid-Konzentration, d. h. des Anteils des aus der Tiefe aufsteigenden Mineralwassers erklären lassen.

Mit Rücksicht auf die Fehlergrenzen kann angenommen werden, daß 1 mval Na⁺/l = 1 mval Cl⁻/l ist.

Bemerkenswerterweise ändert sich auch die Magnesium-Konzentration proportional zur Chlorid-Konzentration: Das Wasser enthält auf 10 mval Cl⁻/l im Mittel etwa 1 mval Mg²⁺/l.

Die Temperatur nimmt bei einer Erhöhung der Chlorid-Konzentration um 10 mval Cl⁻/l durchschnittlich um 0,56° zu.

Der Schwefelwasserstoffgehalt wird mit abnehmender Chlorid-Konzentration geringer, als dies bei einer proportionalen Abnahme der Fall wäre. Im statistischen Mittel nimmt das Verhältnis zwischen Schwefelwasserstoffgehalt und Chlorid-Konzentration z. B. von 0,060 mmol H₂S / 1 mval Cl⁻ auf 0,052 mmol H₂S / 1 mval Cl⁻ ab, wenn die Chlorid-Konzentration von 46 mval/l auf 21 mval/l fällt. Nach der Extrapolation hätte das Wasser keinen Schwefelwasserstoff mehr, wenn seine Chlorid-Konzentration auf 4,8 mval/l fällt, obwohl es dann immer noch 10,4 % des ursprünglich schwefelwasserstoffhaltigen Mineralwassers enthält. Die mit zunehmender Verdünnung degressive Abnahme ist mit der Oxidation des Schwefelwasserstoffs durch den im oberflächennäheren Grundwasser enthaltenen Sauerstoff zu erklären.

4.52 Beziehungen zwischen Chlorid-Konzentration, Härten und Kalium-Konzentration

Währenddem die Temperatur, die Natrium- und Magnesium-Konzentrationen sowie der Schwefelwasserstoffgehalt für die Gesamtheit der Pumpversuchsperiode vom 12. bis 29. Juni 1972 die gleichen statistischen Abhängigkeiten ergeben, sind diesbezüglich für Hydrogenkarbonat-Konzentration (Karbonathärte), Bleibende Härte und Kalium-Konzentration die zwei verschiedenen Perioden:

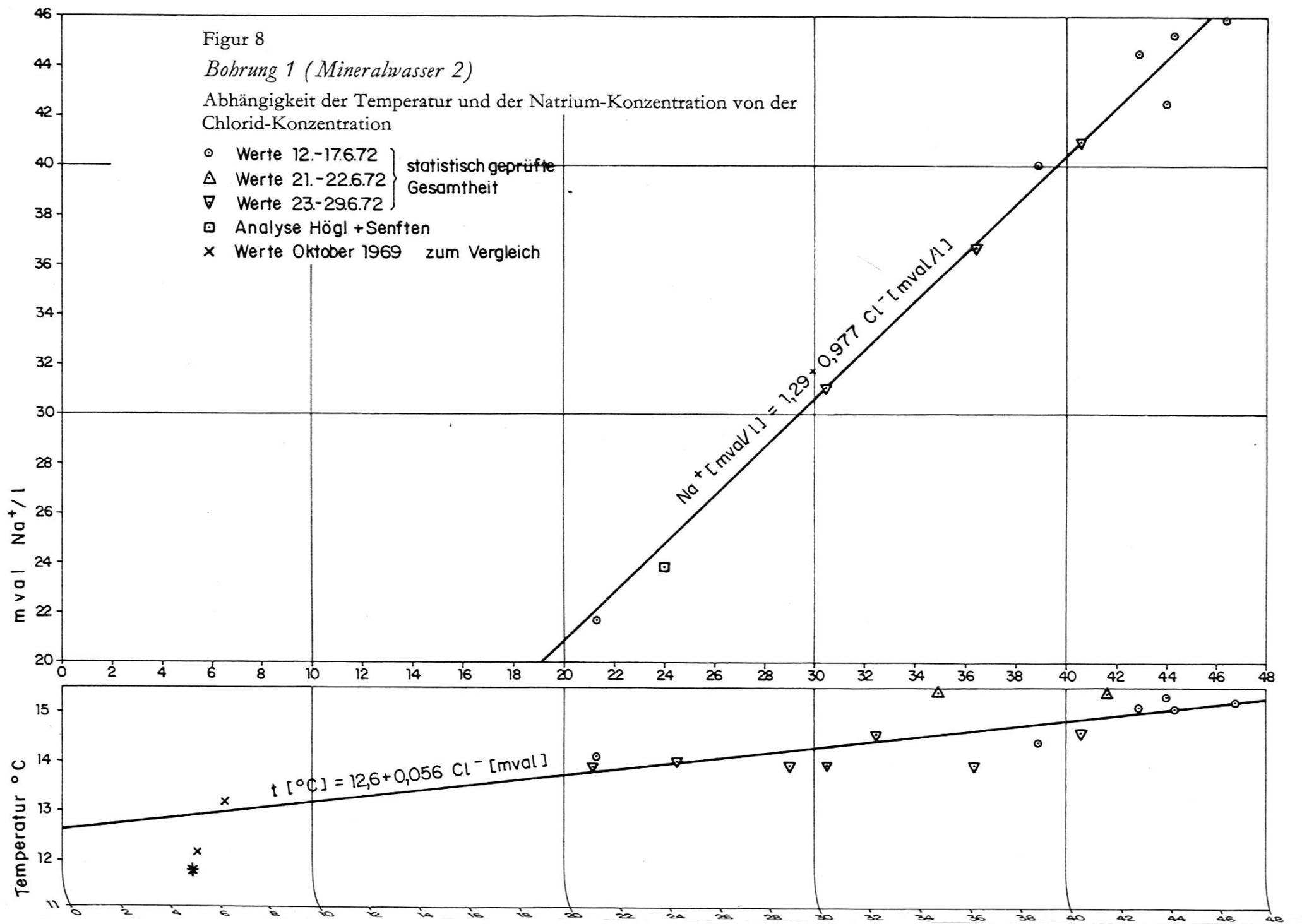
Periode 1: 12.–17. Juni 1972

Periode 2: 23.–29. Juni 1972

zu erkennen; die zwei Analysen vom 21. und 22. Juni 1972 liegen im Übergang zwischen diesen beiden Perioden.

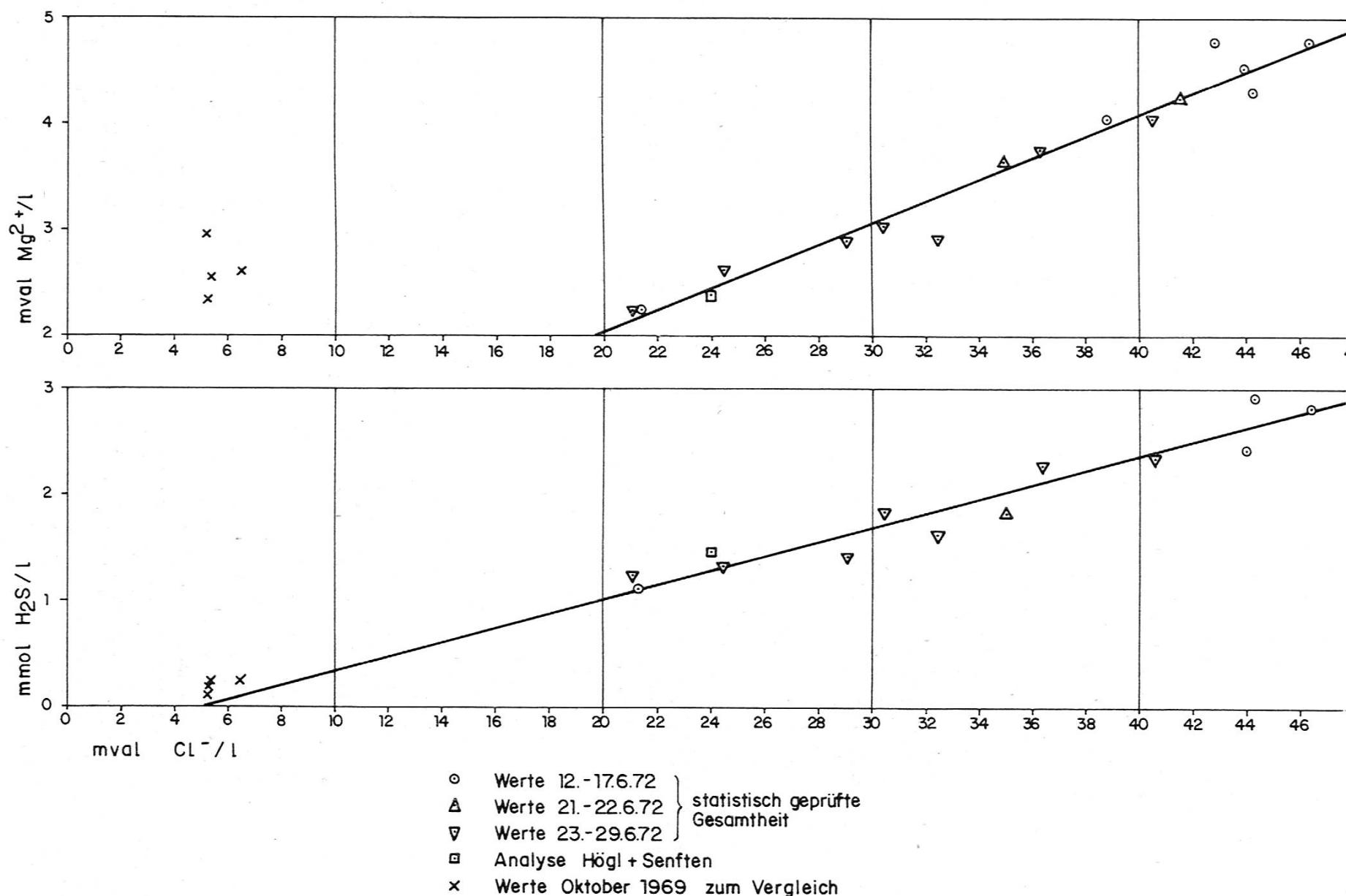
In Periode 1 ist die Karbonathärte größer, in Periode 2 kleiner als die Bleibende Härte. Trotz der geringen Zahl von Wertepaaren ist in Periode 1 die Abhängigkeit der Karbonathärte (Fig. 10), in Periode 2 die der Bleibenden Härte von der Chlorid-Konzentration statistisch hoch gesichert ($I > 0,999$). Die Abhängigkeiten der Bleibenden Härte in Periode 1 und der Karbonathärte in Periode 2 sind zwar wegen der geringen Steigung der Regressionsgeraden selbst nicht statistisch gesichert ($I < 0,99$). Die Sicherheit ergibt sich aber daraus, daß die Summen von Karbonathärteten und Bleibenden Härten den wiederum statistisch gesicherten ($I > 0,99$) Gesamthärteten entsprechen.

Die Abhängigkeit der Kalium-Konzentration (Fig. 10, Tab. 10) ist in Periode 1 statistisch hoch gesichert. In Periode 2 ist der Nachweis dieser



Figur 9
Bohrung 1 (Mineralwasser 2)

Abhängigkeit der Magnesium-Konzentration und des Schwefelwasserstoffgehalts von der Chlorid-Konzentration



statistischen Sicherheit nicht möglich, da nur drei Kalium-Bestimmungen vorliegen; der Unterschied gegenüber Periode 1 ist aber offenkundig (vgl. Fig. 10).

Tabelle 10
Bohrung 1 (Mineralwasser 2)
Statistische Abhängigkeit der Härten und der Kalium-Konzentration von der Chlorid-Konzentration

Statistische Regression	Zahl der Werte N	Bestimmt- heitsmaß B	Student-t-Verteilung Sicherheitsgrad I mit N-2 Freiheitsgraden
<i>Periode 1</i>			
KH (mval/l) = $4,15 + 0,115 \text{Cl}^-$	6	0,997	0,999997
BH (mval/l) = $0,57 + 0,054 \text{Cl}^-$	6	0,801	0,984070
Summe = $4,72 + 0,169 \text{Cl}^-$			
GH (mval/l) = $4,74 + 0,168 \text{Cl}^-$	6	0,987	0,999939
K ⁺ (mval/l) = $0,00 + 0,015 \text{Cl}^-$	6	0,995	0,999990
<i>Periode 2</i>			
KH (mval/l) = $3,80 + 0,041 \text{Cl}^-$	7	0,371	0,853561
BH (mval/l) = $-0,15 + 0,152 \text{Cl}^-$	7	0,987	0,999993
Summe = $3,65 + 0,193 \text{Cl}^-$			
GH (mval/l) = $3,65 + 0,193 \text{Cl}^-$	7	0,897	0,998789
K ⁺ (mval/l) = $0,07 + 0,007 \text{Cl}^-$	3	0,968	0,890174

4.53 Berechnete Beschaffenheit des Mineralwassers und des beigemischten Grundwassers

Das Grundwasser, das dem aufsteigenden Mineralwasser beigemischt wird, hat nach den statistischen Beziehungen folgende Härten:

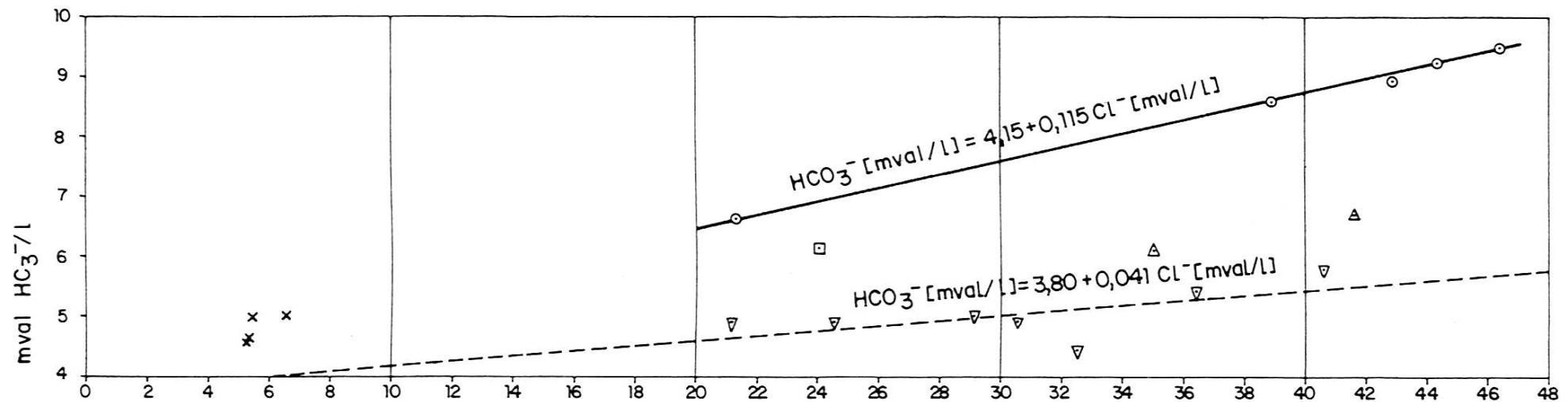
Tabelle 11
Bohrung 1 (Mineralwasser 2)
Berechnete Härten des dem Mineralwasser beigemischten Grundwassers

	Periode 1	Periode 2	Mittel
Karbonathärte HCO_3^- (mval/l)	4,15	3,80	3,98
Bleibende Härte	0,57	-0,15	0,21
Gesamthärte $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ (mval/l)	4,72	3,65	4,19

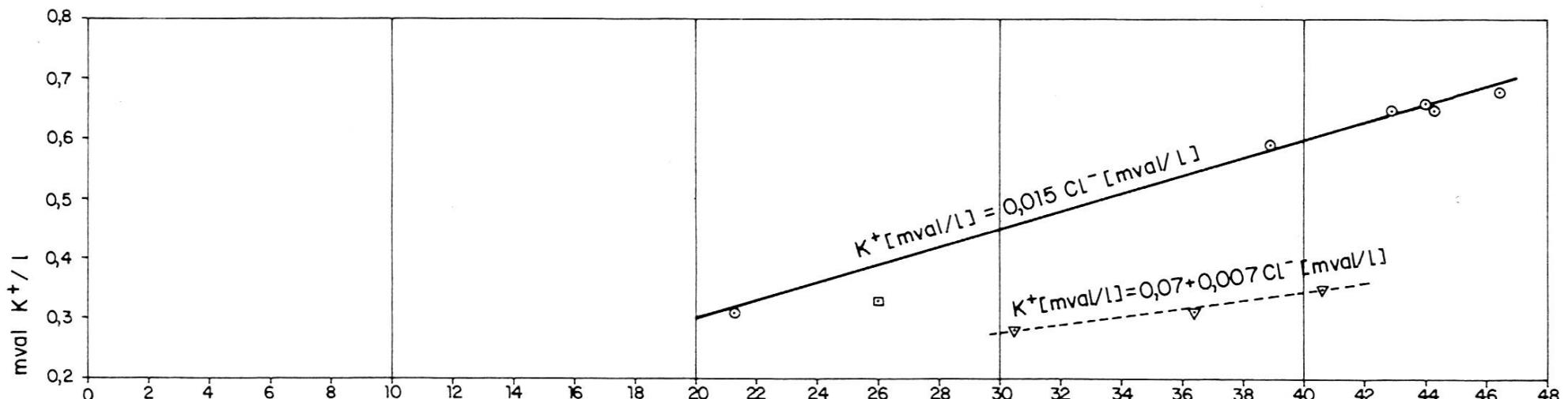
Der Unterschied zwischen den beiden Perioden kann in den Fehlergrenzen liegen und ist nicht wesentlich. Magnesium wäre nach der für beide

Figur 10
Bohrung 1 (Mineralwasser 2)

Abhängigkeit der Karbonathärte (Hydrogenkarbonat-Konzentration) und der Kalium-Konzentration von der Chlorid-Konzentration



- Werte 12.-17.6.72 = Statistisch geprüfte Gesamtheit Periode 1
- △ Werte 21.-22.6.72
- ▽ Werte 23.-29.6.72 = Statistisch geprüfte Gesamtheit Periode 2
- Analyse Högl + Seften
- ✗ Werte Oktober 1969 zum Vergleich



Perioden gültigen Regression im beigemischten Grundwasser nicht vorhanden; auch mit Rücksicht auf die Fehlergrenzen sind in jedem Falle nur geringe Mengen anzunehmen. Beim beigemischten Grundwasser handelt es sich somit vorwiegend um ein Calcium-Hydrogenkarbonat-Wasser ($\text{Ca}-\text{HCO}_3$), das am wahrscheinlichsten im Mittel etwa 4,0 mval HCO_3^-/l und etwa 4,2 mval Ca^{2+}/l enthält.

Wenn wir annehmen, daß das die maximal festgestellte Chlorid-Konzentration von 46 mval Cl^-/l enthaltende Wasser das aufsteigende Mineralwasser ist, enthält dieses nach Ergänzung der Sulfate folgende Hauptbestandteile:

Tabelle 12
Bohrung 1 (Mineralwasser 2)
Berechnete Hauptbestandteile im Mineralwasser ohne Beimischung
oberflächennahen Grundwassers

	mval/l		mval %	
	Periode 1	Periode 2	Periode 1	Periode 2
Natrium Na^+	46,23	46,23	77,8	78,1
Kalium K^+	0,69	0,39	1,2	0,7
Magnesium Mg^{2+}	4,68	4,68	7,9	7,9
Calcium Ca^{2+}	7,79	7,85	13,1	13,3
	59,39	59,15	100,0	100,0
Chlorid Cl^-	46,00	46,00	77,5	77,8
Sulfat SO_4^{2-}	3,95	7,46	6,6	12,6
Hydrogenkarbonat HCO_3^-	9,44	5,69	15,9	9,6
	59,39	59,15	100,0	100,0
Schwefelwasserstoff			2,76 mmol/l (= 94 mg/l)	
Temperatur			15,2 °C	

Bei gleichem Natrium-Chlorid-Gehalt enthielt also das Mineralwasser in Periode 2 mehr Sulfat, aber weniger Hydrogenkarbonat und weniger Kalium als in Periode 1. Wahrscheinlich ist das aufsteigende Mineralwasser selbst schon eine Mischung, wobei dem Natrium-Chlorid-Wasser zeitweilen (Periode 1) ein hydrogenkarbonathaltiges und zeitweilen (Periode 2) ein relativ sulfatreiches Wasser beigemischt wird.

4.54 Änderungen der Beschaffenheit während der Pumpversuche

Die Analysen der in der Zeit vom 12. bis 29. Juni 1972 bei verschiedenen artesischen Überlaufmengen und Druckhöhen entnommenen Proben zeigen, daß der Anteil des aus der Tiefe aufsteigenden Mineralwassers an dem

in einer Menge von 9 l/min gepumpten Wasser bei gleichzeitigem artesischem Überlauf am größten war. Temperatur, Schwefelwasserstoffgehalt sowie Chlorid-, Natrium- und Magnesium-Konzentration hatten bei diesem Zustand ihre Maxima (Fig. 11 und 12). Wir erklären dies damit, daß bei artesischem Überdruck das in einem höheren Niveau zufließende und spezifisch leichtere Grundwasser am Brunnenkopf überläuft, so daß aus der Tiefe des Brunnens, über dessen Sohle die Pumpe eingebaut war, das mit keinem oder wenig mineralärmerem Grundwasser vermischt Tiefenwasser gepumpt wurde. Niederschläge haben somit keine die Mineralisation herabsetzende, sondern im Gegenteil eine sie erhöhende Wirkung.

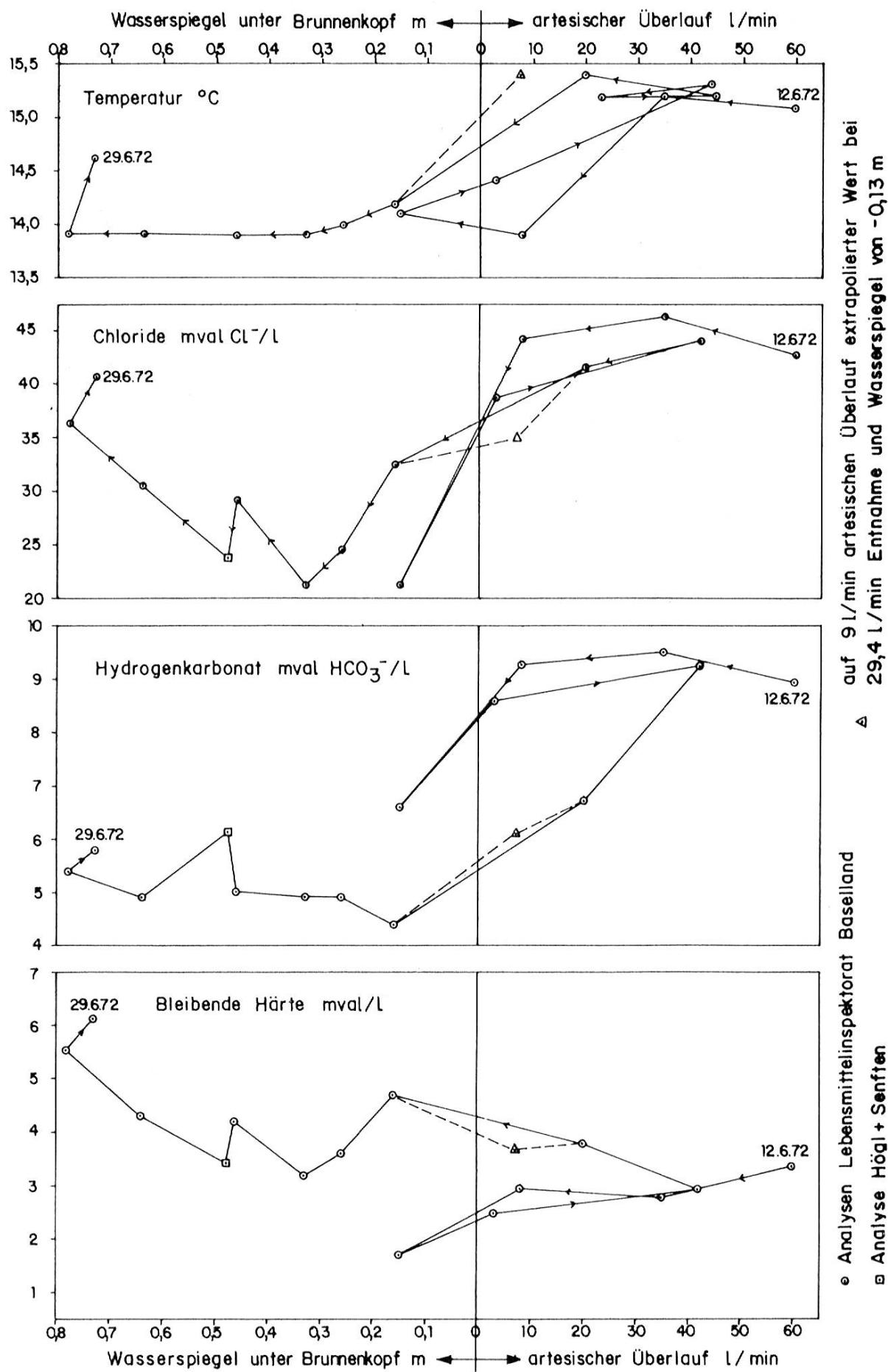
Am niedrigsten waren die Temperaturen, der Schwefelwasserstoffgehalt und die Mineralisation, als der Wasserspiegel bei einer Entnahme von 9 l/min in etwa 0,1–0,5 m Tiefe lag (Fig. 11 und 12). Bei diesem Zustand konnte das mineralärmere Grundwasser nicht mehr überlaufen, floß aber noch in so großen Mengen in den Brunnen, daß seine nun beim Pumpbetrieb zwangsläufig entstehende Vermischung mit dem Tiefenwasser dessen Temperatur, Schwefelwasserstoffgehalt und Mineralisation herabsetzte.

Mit weiter sinkendem hydrostatischem Niveau stiegen Temperatur, Schwefelwasserstoffgehalt und Mineralisation wieder an (Fig. 11 und 12). Die Menge des dem Brunnen zufließenden mineralärmeren Grundwassers nimmt demnach mit sinkendem hydrostatischem Niveau ab und ist somit von den einige Tage vorher gefallenen Niederschlägen abhängig (vgl. Ziff. 4.3). Die gegenüber der Zeit des artesischen Überlaufs veränderte Druckhöhe bewirkte aber, daß nun aus der Tiefe ein Wasser mit abweichender Beschaffenheit, offenbar aus einem anderen Bereich des Kluft- oder Karstsystems, zufloß.

Wiederum andere Verhältnisse waren zur Zeit der im Oktober 1969 mit Förderleistungen von 60–300 l/min betriebenen Pumpversuche vorhanden gewesen. Temperatur, Schwefelwasserstoffgehalt und Hydrogenkarbonat-Konzentration (Karbonathärte) hatten Größenordnungen, wie sie bei den gemessenen Chlorid-Konzentrationen unter Berücksichtigung der Fehlergrenzen aufgrund der für Juni 1972 berechneten statistischen Beziehungen vorauszusagen gewesen wären. Die Gesamthärte, die Bleibende Härte sowie die Magnesium-Konzentration waren aber wesentlich größer, als sie bei entsprechend niedrigen Chlorid-Konzentrationen, d. h. bei verstärkten Fremdwasserzuflüssen im Juni 1972 zu erwarten gewesen wären. Währenddem das mineralärmere Grundwasser im niederschlagsreichen Juni 1972 ein verhältnismäßig schwach mineralisiertes Calcium-Hydrogenkarbonat-Wasser war, hatte es im sehr trockenen Oktober 1969 eine vorwiegend durch Calcium-Sulfat (Gips) verstärkte Mineralisation.

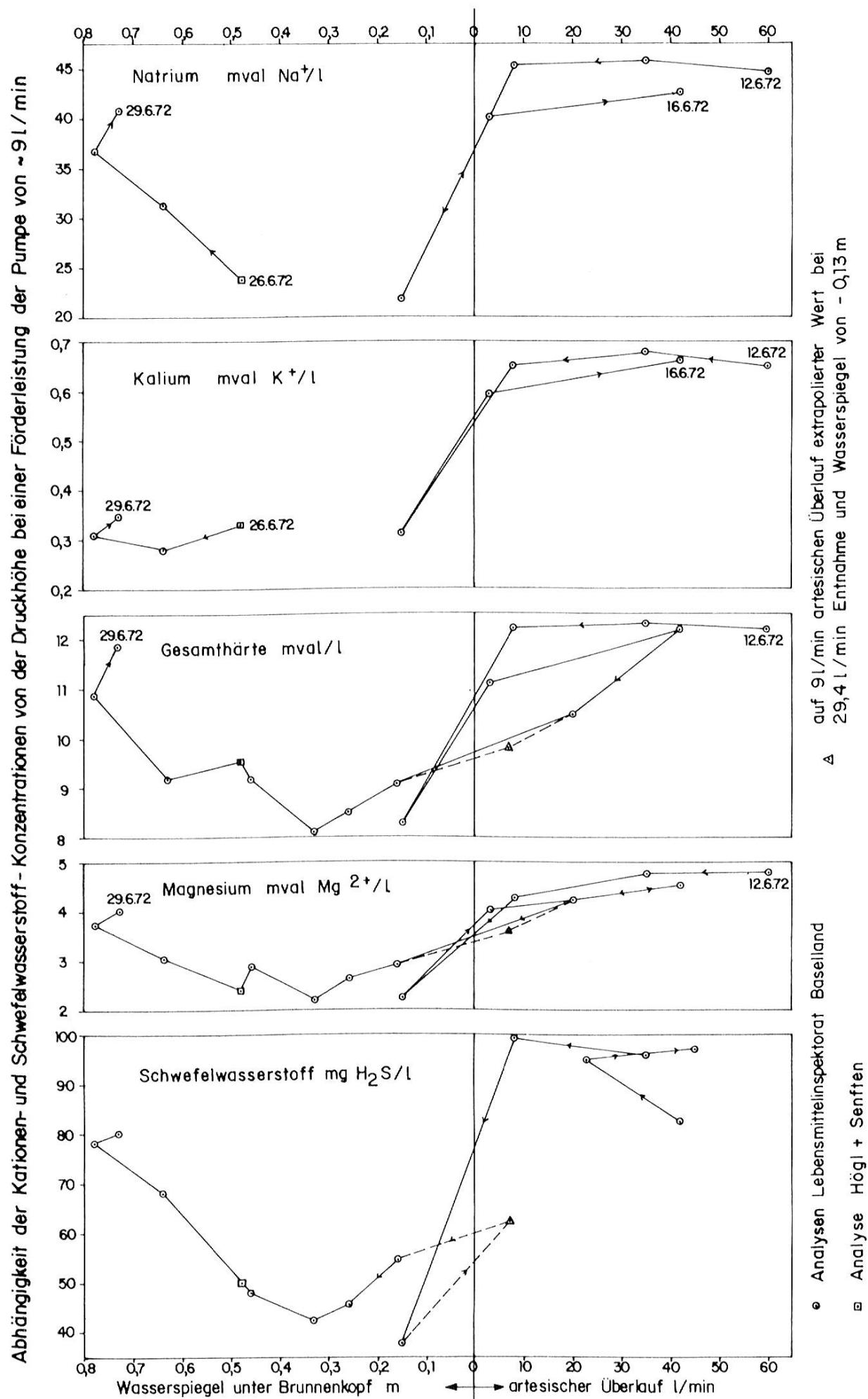
Figur 11
Bohrung 1 (Mineralwasser 2)

Abhängigkeit der Temperatur und der Anionen-Konzentrationen von der Druckhöhe
bei einer Förderleistung der Pumpe von $\sim 9 \text{ l/min}$



Figur 12
Bohrung 1 (Mineralwasser 2)

Abhängigkeit der Kationen- und Schwefelwasserstoffkonzentrationen von der Druckhöhe bei einer Förderleistung der Pumpe von $\sim 91/\text{min}$



4.55 Chemischer Charakter

Die je nach Druckhöhe und Förderleistung unterschiedlichen Mineralisationen zeigen, daß Einzelanalysen jeweils nur einen zufälligen Ausschnitt aus der Variationsbreite des Mineralwassers geben können.

So war die von Prof. Dr. O. HÖGL und Dr. H. SENFTEN eingehend untersuchte Probe vom 26. Juni 1972 bei einem Zustand mit verhältnismäßig starker Beimischung mineralärmeren Grundwassers erhoben worden. Für den 13. Juni 1972 und den 29. Juni 1972 ergeben sich mit ausgeglichenen Ionenbilanzen vergleichsweise folgende approximativen Mineralgehalte (mg/l gerundete Werte):

Tabelle 13
Bohrung 1 (Mineralwasser 2)
Beschaffenheit des Mineralwassers am 13. Juni 1972 und 29. Juni 1972
im Vergleich zur eingehenden Analyse vom 26. Juni 1972

	13.6.1972		26.6.1972		29.6.1972	
	mval/l	mg/l	mval/l	mg/l	mval/l	mg/l
Natrium Na ⁺	45,89	1055	23,92	550	40,93	941
Kalium K ⁺	0,68	27	0,33	13	0,35	14
Magnesium Mg ²⁺	4,77	58	2,39	29	4,07	50
Calcium Ca ²⁺	7,53	151	7,20	144	7,83	157
Übrige Kationen	-	-	0,14	4	-	-
Total Kationen	>58,87	>1291	33,98	740	>53,18	>1162
Chlorid Cl ⁻	46,40	1645	23,97	850	40,62	1440
Sulfat SO ₄ ²⁻	2,97	143	3,81	183	6,76	325
Hydrogenkarbonat HCO ₃ ⁻ ...	9,50	580	6,15	375	5,80	354
Übrige Anionen	-	-	0,02	1	-	-
Total Anionen	>58,87	>2368	33,95	1409	>53,18	>2119
Undissozierte Bestandteile ...		-		20		-
Total gelöste feste Bestandteile		>3659		2169		>3281
Schwefelwasserstoff		96		50		80
Temperatur °C		15,2		13,9		14,6

Der Mineralgehalt kann also, wenn ein Zufluß mineralärmeren Grundwassers möglichst verhindert ist, rund 1,7mal größer als nach der eingehenden Analyse vom 26. Juni 1972 sein.

Die Analyse vom 13. Juni 1972 entspricht jedoch noch nicht dem höchstmöglichen Mineralgehalt des Wassers. Nach von A. HARTMANN (1953)

publizierten Untersuchungen hatte er, wahrscheinlich 1942, bei einer Entnahme von 7 l/min, eine Chlorid-Konzentration von 2400 mg/l, einen Trockenrückstand von 4966 mg/l und einen Schwefelwasserstoffgehalt von 138,5 mg/l gefunden. Das Vorkommen von Wasser mit einem sehr hohen Schwefelwasserstoffgehalt von 128–141 mg/l wird durch die Untersuchung der am 2. Oktober 1969 aus der Tiefe geschöpften Proben bestätigt. Auch der sich aus der Umrechnung der Analyse von 1865 ergebende Schwefelwasserstoffgehalt von 210 mg/l ist unter den gegebenen Umständen mindestens denkbar.

Bemerkenswert ist die bei geringer Beimischung mineralärmeren Grundwassers im Vergleich zu geologisch sonst ähnlichen Wässern zeitweilen relativ hohe Hydrogenkarbonat-Konzentration. Der in der Probe vom 13. Juni 1972 gemessene Maximalwert jenes Jahres von 9,5 mval/l wurde bereits in der Analyse von 1913 mit 8,57 mval/l fast erreicht und in der Analyse von 1865 mit 11,85 mval/l überschritten.

Die Unterschiede zwischen den Analysen von 1830, 1865, 1913 und 1972 (Tab. 14 und 15) beruhen zweifellos nur zum Teil, z.B. für das früher zu hoch bestimmte Kalium, auf der Ungenauigkeit älterer Untersuchungsmethoden und sind im wesentlichen mit den auch bei den jüngsten Untersuchungen festgestellten Schwankungen zu erklären. In der Dreiecksdarstellung der Kationen- und der Anionenverhältnisse (Fig. 13 und 14) liegen deshalb die Untersuchungsergebnisse von 1830 bis 1913 im gleichen Streubereich wie 1972 oder in dessen Nähe.

Mit zunehmender Beimischung von mineralärmerem Grundwasser nimmt nicht nur die Mineralkonzentration, sondern auch der prozentuale Anteil an Chlorid- und Natrium-Ionen ab. Bei den im Oktober 1969 getätigten sehr großen Entnahmen von 60–300 l/min waren die Kationen- und die Anionenverhältnisse ähnlich wie in den Thermen von Baden und Bad Schinznach, allerdings bei niedriger Gesamtmineralisation. Immerhin hätte selbst der bei einer Entnahme von 300 l/min gefundene Mineralgehalt von etwa 1033 mg/l, namentlich auch der noch 4,7 mg/l betragende Schwefelwasserstoffgehalt, den an ein Mineralwasser gestellten Anforderungen knapp genügt.

Tabelle 14
Mineralwasser 2
Analysen 1830–1972 | mg/l

mg/l	AESCHBACH 29.7.1830	BOLEY Frühjahr 1865	HARTMANN 6.5.1913	HÖGL und SENFTEN 16.8.1916**	26.6.1972
<i>Kationen</i>					
Ammonium NH ₄ ⁺	—	—	1,5	1,15	
Lithium Li ⁺	—	—	—	0,2	
Natrium Na ⁺	598	1188,1	638,2	550	
Kalium K ⁺	—	301,3*	132,6	12,9	
Magnesium Mg ²⁺	27	59,1	44,5	29	
Calcium Ca ²⁺	118	137,1	154,2	114	
Strontium Sr ²⁺	—	—	—	2,4	
Mangan Mn ²⁺	—	—	—	<0,02	
Eisen Fe ²⁺	—	4,2	2,8	0,55	
Kupfer Cu ²⁺	—	—	—	0,013	
Zink Zn ²⁺	—	—	—	0,0005	
Blei Pb ²⁺	—	—	—	<0,001	
Aluminium Al ³⁺	—	—	0,3	0,060	
Summe Kationen	743	1689,8*	974,1	710,29	
<i>Anionen</i>					
Fluorid F ⁻	—	—	—	0,36	
Chlorid Cl ⁻	937	1832,3	987,5	850	
Bromid Br ⁻	—	—	—	0,15	
Jodid J ⁻	—	—	—	0,08	
Nitrat NO ₃ ⁻	—	—	—	<0,1	
Hydrogenkarbonat HCO ₃ ⁻ ..	226	723,1	523,0	375	
Sulfat SO ₄ ²⁻	192	370,1	302,5	183	
Hydrogenphosphat HPO ₄ ²⁻ ..	—	—	—	0,13	
Hydrogenarsenat HAsO ₄ ²⁻ ...	—	—	—	0,0078	
Molybdän Mo	—	—	—	<0,0005	
Summe Anionen	1355	2925,5*	1813,0	1408,83	
<i>Undissozierte Bestandteile</i>					
Metakieselsäure H ₂ SiO ₃	1	22,6	10,6	11,7	
Orthoborsäure H ₃ BO ₃	—	—	—	8,0	

* Ionenbilanz ohne Berücksichtigung der in der Originalanalyse als unterschweflig-saures Kalium (K₂SO₂) und Schwefelkalium (K₂S) angegebenen Salze; entsprechender Schwefelgehalt, aber zusammen mit 91,1 mg/l «halbgebundenem Schwefelwasserstoff», zum Schwefelwasserstoff gezählt.

** Gase.

Tabelle 14 (Fortsetzung)

mg/l	AESCHBACH 29.7.1830	BOLEY Frühjahr 1865	HARTMANN 6.5.1913	HÖGL und SENFTEN 16.8.1916**	26.6.1972
Summe undissoziierter Bestandteile	1	22,6	10,6	19,7	
<i>Summe der gelösten Mineral-</i> Bestandteile	2099	4637,9*	2797,7	2138,82	
<i>Gelöste Gase</i>					
Schwefelwasserstoff H ₂ S	53,5	210	73,4	50	
Sauerstoff O ₂	—	—	0	0	
Stickstoff N ₂	26,3	—	25,1	—	
Kohlensäure CO ₂	83,3	—	25,6	—	
<i>Physikalische Daten</i>					
Wassertemperatur °C	13,8	14,6	14,8	13,6	
Dichte (20/20°)	—	—	—	1,00183	
Leitfähigkeit $\mu\text{S}/\text{cm}$	—	—	—	2700	
pH	—	—	—	6,8	

* Ionenbilanz ohne Berücksichtigung der in der Originalanalyse als unterschweisligsaures Kalium (K₂SO₄) und Schwefelkalium (K₂S) angegebenen Salze; entsprechender Schwefelgehalt, aber zusammen mit 91,1 mg/l «halbgebundenem Schwefelwasserstoff», zum Schwefelwasserstoff gezählt.

** Gase.

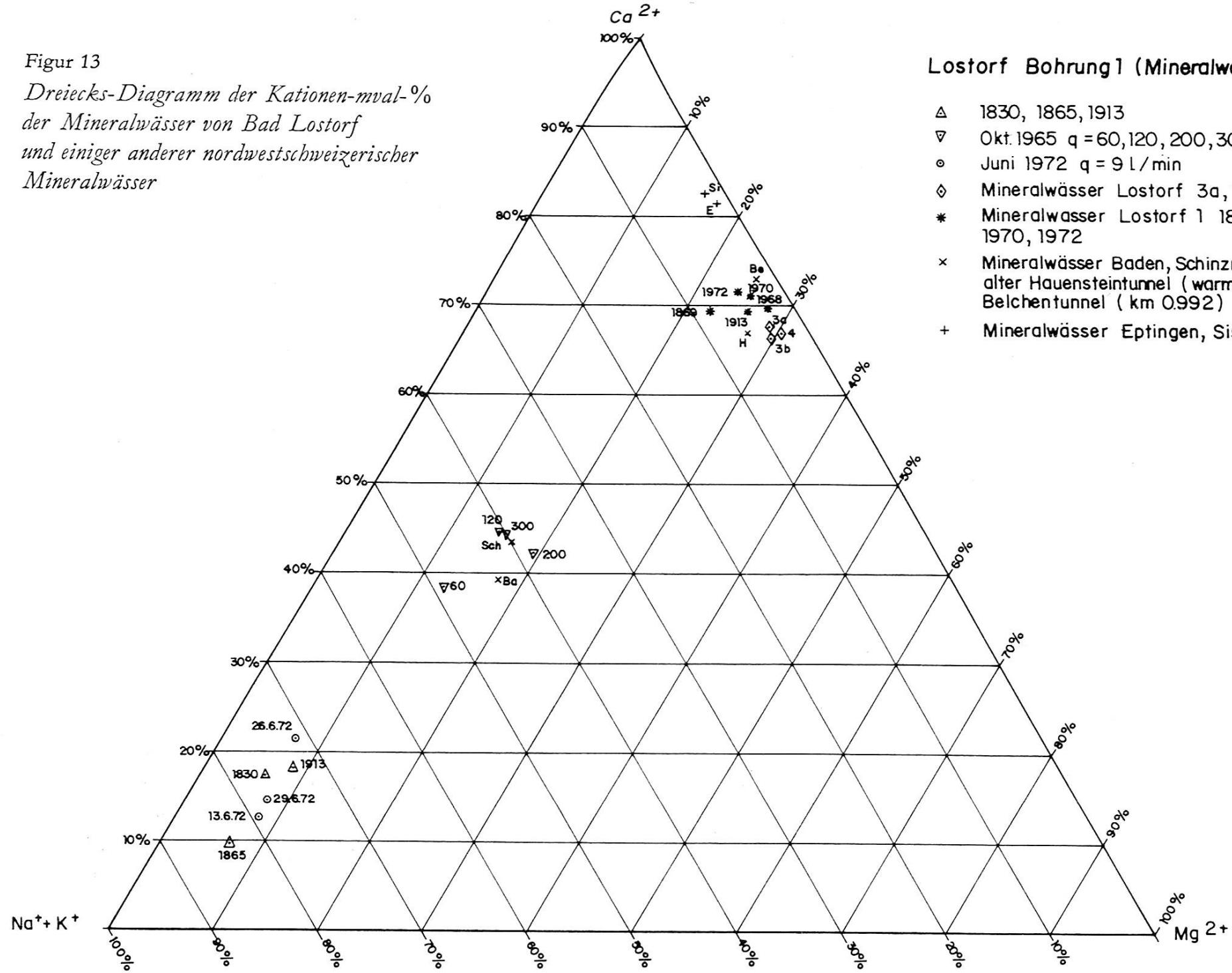
Tabelle 15
Mineralwasser 2
Analysen 1830–1972 | mval/l und mval-%

mval/l	AESCHBACH 29.7.1830	BOLEY Frühjahr 1865	HARTMANN 6.5.1913	HÖGL und SENFTEN 26.6.1972
<i>Kationen</i>				
Ammonium NH ₄ ⁺	—	—	0,08	0,07
Natrium Na ⁺	26,01	51,68	27,76	23,92
Kalium K ⁺	—	7,71*	3,39	0,33
Magnesium Mg ²⁺	2,23	4,86	3,66	2,39
Calcium Ca ²⁺	5,90	6,84	7,70	7,20
Strontium Sr ²⁺	—	—	—	0,05
Eisen Fe ²⁺	—	0,15	0,10	0,02
Aluminium Al ³⁺	—	—	0,03	—
Total Kationen	34,14	71,24*	42,72	33,98
<i>Anionen</i>				
Fluorid F ⁻	—	—	—	0,02
Chlorid Cl ⁻	26,44	51,68	27,85	23,97
Hydrogenkarbonat HCO ₃ ⁻ ...	3,70	11,85	8,57	6,15
Sulfat SO ₄ ²⁻	4,00	7,71	6,30	3,81
Total Anionen	34,14	71,24*	42,72	33,95
<i>mval-%</i>				
<i>Kationen</i>				
Ammonium NH ₄ ⁺	—	—	0,2	0,2
Natrium Na ⁺	76,2	72,6	65,0	70,3
Kalium K ⁺	—	10,8*	7,9	1,0
Magnesium Mg ²⁺	6,5	6,8	8,6	7,0
Calcium Ca ²⁺	17,3	9,6	18,0	21,4
Eisen Fe ²⁺	—	0,2	0,2	0,1
Aluminium Al ³⁺	—	—	0,1	—
Total Kationen	100,0	100,0	100,0	100,0
<i>Anionen</i>				
Chlorid Cl ⁻	77,5	72,6	65,2	70,5
Hydrogenkarbonat HCO ₃ ⁻ ...	10,8	16,6	20,1	18,2
Sulfat SO ₄ ²⁻	11,7	10,8	14,7	11,3
Total Anionen	100,0	100,0	100,0	100,0

* Ionenbilanz ohne Berücksichtigung der in der Originalanalyse als unterschweifig-saures Kalium (K₂SO₂) und Schwefelkalium (K₂S) angegebenen Salze; entsprechender Schwefelgehalt, aber zusammen mit 91,1 mg/l «halbgebundenem Schwefelwasserstoff», zum Schwefelwasserstoff gezählt.

Figur 13

Dreiecks-Diagramm der Kationen-mval-%
der Mineralwässer von Bad Lostorf
und einiger anderer nordwestschweizerischer
Mineralwässer

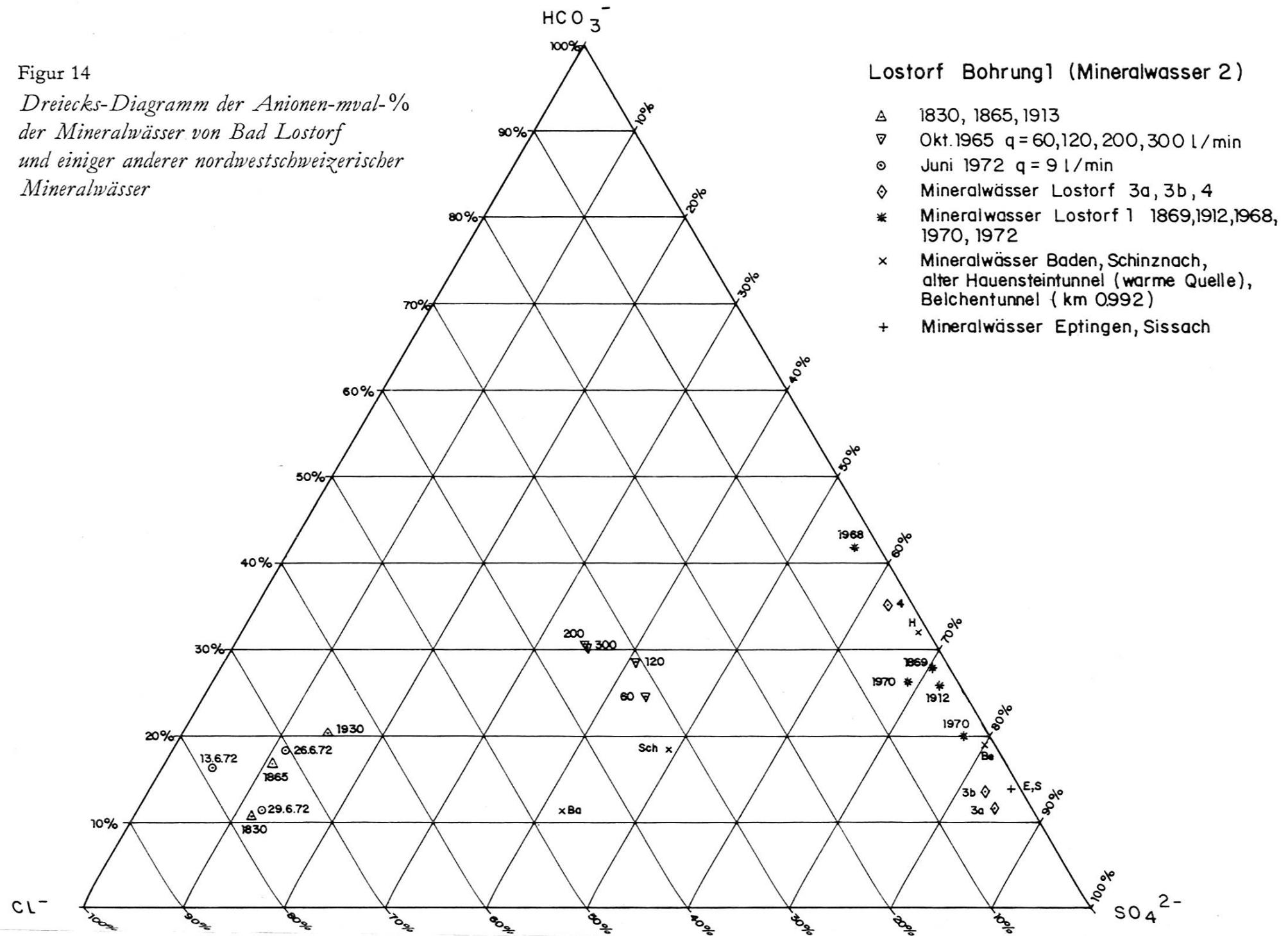


Lostorf Bohrung 1 (Mineralwasser 2)

- △ 1830, 1865, 1913
- ▽ Okt. 1965 $q = 60, 120, 200, 300 \text{ l/min}$
- Juni 1972 $q = 9 \text{ l/min}$
- ◊ Mineralwässer Lostorf 3a, 3b, 4
- * Mineralwasser Lostorf 1 1869, 1912, 1968, 1970, 1972
- × Mineralwässer Baden, Schinznach, alter Hauensteintunnel (warme Quelle), Belchentunnel (km 0.992)
- + Mineralwässer Eptingen, Sissach

Figur 14

Dreiecks-Diagramm der Anionen-mval-%
der Mineralwässer von Bad Lostorf
und einiger anderer nordwestschweizerischer
Mineralwässer



Lostorf Bohrung 1 (Mineralwasser 2)

5. Mineralwasser Lostorf 3

5.1 Sondierbohrungen (und Fassung)

5.11 Bohrung 2 (Mineralwasser Lostorf 3a)

Die westlich Bad Lostorf 1971 als Sondierung angesetzte Bohrung 2 erreichte in 259,50 m den als obersten Aquifer eines Mineralwassers in Frage kommenden Trigonodusdolomit des aufgeschobenen Dottenberg-Südschenkels. Die Bohrung wurde im Trigonodusdolomit noch bis 280,00 m vertieft und blieb ab 257,00 m mit einem Durchmesser von 143 mm unverrohrt.

Die Gipskeuperstrecke war derart druckhaft, daß das Stahlrohr \varnothing 6" (nahtlose Siederohre ST 35) bei 182 m zusammengedrückt wurde und das Bohrgestänge unterhalb 160 m nicht mehr zurückgezogen werden konnte.

5.12 Bohrung 3 (Mineralwasser Lostorf 3b)

Mit dem Ziel, tiefere Aquifers als den bereits mit Bohrung 2 angetroffenen zu erschließen, wurde 1972 die Bohrung 3 8,45 m nördlich angesetzt. Sie traf in 247,0 m auf den Trigonodusdolomit des aufgeschobenen Dottenberg-Südschenkels und wurde im Trigonodusdolomit, im Hauptmuschelkalk und im Mittleren Muschelkalk zunächst bis 363,0 m, d. h. 2,0 m unter die Obergrenze der Sulfatzone des Mittleren Muschelkalks vertieft. Für die weitere Vertiefung mußte die Bohrung mit einer neuen Teleskoptour verrohrt werden. Vorher benützten wir die Gelegenheit, den bereits in Bohrung 2 angeschürften, nun aber in der vollen Mächtigkeit aufgeschlossenen Aquifer des Oberen Muschelkalks (Trigonodusdolomit und Hauptmuschelkalk) zu testen. Bei diesem Zustand war das Bohrloch \varnothing 311 mm von 247 bis 358 m unverrohrt offen.

Nach dem Pumpversuch ist der Aquifer durch die zur Vertiefung der Bohrung eingesetzten und von 360,27 m bis 348,00 m zementierten Rohre \varnothing 292/280 mm abgeschlossen worden und seither in Bohrung 3 nicht mehr zugänglich.

5.13 Bohrung 4 (Mineralwasser Lostorf 3c)

Für die definitive Fassung der erstmals mit Bohrung 2 erschlossenen Calcium-Sulfat-Schwefel-Therme ließ die Bad Lostorf AG 8,03 m nordwestlich die Bohrung 4 ausführen. Sie traf in 252,60 m auf den Trigonodusdolomit und wurde in diesem wie Bohrung 2 bis auf 280,00 m abgeteuft. Das Mineralwasser tritt durch die bei 254,00–280,00 m in die Bohrung \varnothing 143 mm eingebauten PVC-Filterrohre \varnothing 100 mm in das Bohrloch ein.

5.2 Druckhöhen des Mineralwassers

Wie in Bohrung 1 (Mineralwasser 2) liegt der Wasserspiegel in Bohrung 2 (Mineralwasser 3a) zeitweilen tiefer als der Bohrlochkopf, und zeitweilen läuft das Wasser artesisch über. Der tiefste beobachtete Wasserstand liegt 4,20–4,23 m unter Bohrlochkopf (27. März 1972, 7. September 1973), der größte gemessene artesische Überlauf beträgt 20,5 l/min (7. April 1973).

Im Gegensatz zu Bohrung 1 zeigt jedoch die Druckhöhe des Mineralwassers der Bohrung 2 keine kurzfristige Abhängigkeit von den Niederschlägen.

Währenddem in Bohrung 1 z. B. vom 9. bis 14. April 1973 ein Anstieg von einem 0,25 unter Brunnenkopf gelegenen Wasserspiegel zu einem 60 l/min betragenden artesischen Überlauf zu verzeichnen war, ging der artesische Überlauf bei Bohrung 2 in der gleichen Zeit von 20 auf 15 l/min zurück (Fig. 6). Der mit dem Anstieg in Bohrung 1 wahrscheinlich zu korrelierende Anstieg in Bohrung 2 von 13 auf 20 l/min fand erst vom 21.–26. März 1973, also zeitlich um 12 Tage verschoben, statt. Der endgültige Abfall vom letzten Maximalwert des artesischen Überlaufs setzte in Bohrung 1 (60 l/min) am 4. Mai 1973, in Bohrung 2 (20 l/min) erst am 12. Mai 1973, also 8 Tage später ein (Fig. 6).

Diese und andere Daten weisen darauf hin, daß die Druckhöhe in Bohrung 2 mit einer zeitlichen Verzögerung von 1–3 Wochen auf Niederschläge und Trockenperioden reagiert.

Die Druckhöhen in Bohrung 3 (oberer Aquifer) und in Bohrung 4 sind annähernd identisch mit denen in Bohrung 2.

5.3 Pumpversuche

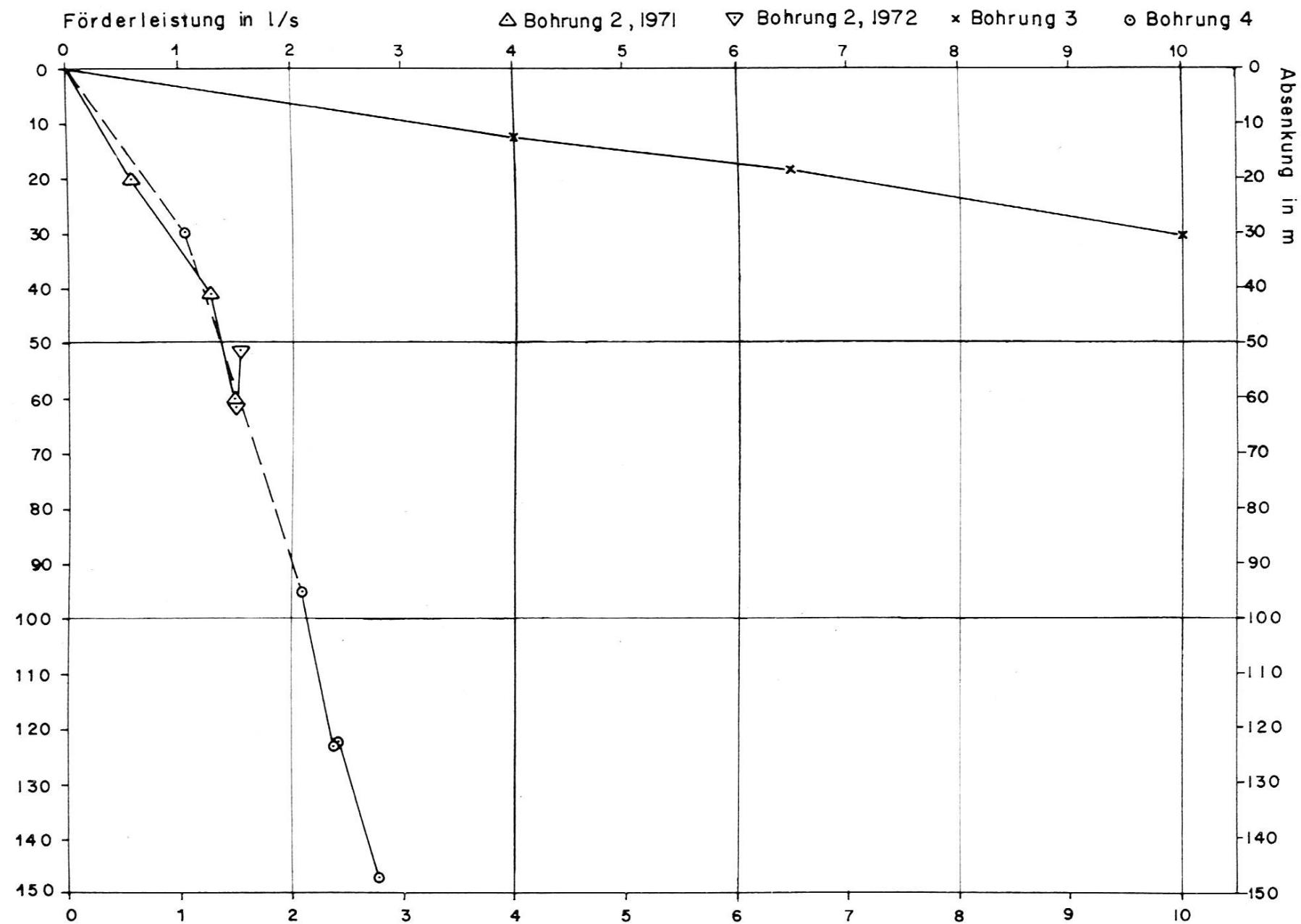
In Bohrung 2 wurden mehrere Pumpversuche, in der Bohrung 3 (oberer Aquifer) während 13 Tagen und in der Bohrung 4 während 24,5 Tagen je ein Dauerpumpversuch ausgeführt.

Aus der den ganzen Aquifer (Oberer Muschelkalk) erschließenden Bohrung 3 konnte wesentlich mehr Wasser gefördert werden als aus den nur in den obersten Teil des Aquifers (Trigonodusdolomit) abgeteuften Bohrungen 2 und 4 (Tab. 16 und Fig. 15).

Während der Pumpversuche aus den Bohrungen 3 und 4 wurde auch der Wasserspiegel in der in 8,45 m und 8,03 m Entfernung den gleichen Aquifer erschließenden Bohrung 2 deutlich abgesenkt (Tab. 16).

Dagegen hatten die Entnahmen aus den Bohrungen 2, 3 und 4 keinen Einfluß auf die Druckhöhe bei der 409–417 m entfernten Bohrung 1.

Figur 15
Förderleistungs-Absenkungs-Diagramm im oberen Aquifer (Mineralwasser 3) von Bad Lostorf



5.4 Auswertung der Pumpversuche

5.41 Verfahren

Zur Ermittlung der Durchlässigkeit des Aquifers haben wir die Pumpversuche nach drei verschiedenen Verfahren ausgewertet:

1. Aus der durch die Entnahme q (l/s) im Pumpbrunnen [mit Bohrradius r (m)] erzeugten Absenkung s (m) der Druckhöhe des Grundwassers kann der Durchlässigkeitsbeiwert k (10^{-3} m/s)²⁰ nach dem THIEMSCHEN Verfahren durch Iteration näherungsweise ermittelt werden, wenn die Distanz R (m), bei welcher die Absenkung den Wert Null erreicht, d.h. die Reichweite des Pumpbrunnens, nach der empirischen Formel von SICHARDT eingesetzt wird:

$$k = \frac{q (\ln R - \ln r)}{2 \cdot \pi \cdot M \cdot s} \quad R = 3000 \sqrt{\frac{k}{1000} \cdot s}$$

Als Mächtigkeit M des gespannten Grundwassers wurde die durch den Pumpbrunnen erschlossene Mächtigkeit des Aquifers angenommen, welche nur in Bohrung 3 gleich groß wie die totale Mächtigkeit (zwischen Obergrenze des Trigonodusdolomits und Untergrenze der Trochitenkalke) ist. Eine alternative Berechnung mit der nach HUISMAN (KRUSEMAN und DE RIDDER 1973) ermittelten fiktiven Absenkung eines vollkommenen, d.h. eines die von Bohrung 3 bekannte ganze Grundwassermächtigkeit erschließenden Brunnens ergab keine wesentlich abweichen- den Resultate.

2. Der Durchlässigkeitsbeiwert k (10^{-3} m/s) lässt sich sodann aus den Absenkungen s_1 (m) und s_2 (m) der Druckhöhe ermitteln, welche bei der Entnahme q (10^{-3} m³/s) einerseits im Pumpbrunnen [mit Bohrradius r (m)] und anderseits bei dem in der Entfernung x (m) den gleichen Aquifer erschließenden Beobachtungsbrunnen gemessen wurden:

$$k = \frac{q (\ln x - \ln r)}{2 \cdot \pi \cdot M (s_1 - s_2)}$$

Das Verfahren ist nur für die Pumpversuche aus den Bohrungen 3 und 4 anwendbar, bei denen die Bohrung 2 als Beobachtungsbrunnen zur Verfügung stand. Auch bei diesem Verfahren sind die Resultate nicht wesentlich verschieden, wenn wir mit den erschlossenen Grundwassermächtigkeiten und den beobachteten Absenkungen oder mit der gesamten Grundwassermächtigkeit und den fiktiven Absenkungen eines vollkommenen Brunnens (Korrekturfaktor nach HUISMAN) rechnen.

3. Nach Pumpschluß steigt die Druckhöhe des Grundwassers wieder an. Dabei können im Pumpbrunnen und im Beobachtungsbrunnen die Rest-

²⁰ «Hydraulische Leitfähigkeit», Abflußmenge in m³/s bezogen auf einen Abflußquerschnitt von 1 m² und ein hydraulisches Gefälle von 1 m/m.

absenkungen $s''(m)$ gemessen werden, welche in den Zeitpunkten $t''(h)$ nach Pumpschluß gegenüber dem vor Pumpbeginn gemessenen Ausgangsstand noch verblieben sind. Für die Auswertung muß die Zeitdauer $t'(h)$ des mit einer konstanten Förderleistung vorangegangenen Pumpbetriebs mitberücksichtigt werden. Da die Förderleistungen in einem gewissen Rahmen variabel waren, haben wir t' näherungsweise als Quotient der total geförderten Wassermenge und der letzten vor Pumpschluß getätigten Förderleistung $q (10^{-3} \text{ m}^3/\text{s})$ ermittelt.

Der Anstieg der Druckhöhe ist theoretisch durch eine halblogarithmische Regressionsgerade mit der fiktiven Restabsenkung $S''(m)$ im Zeitpunkt $t' + t'' = t'' = \infty$ und mit dem Regressionskoeffizienten β gegeben:

$$s'' = S'' + \beta \cdot \lg \frac{t' + t''}{t''}$$

Die durch die Entnahme noch nicht gestörte oder nicht mehr gestörte Druckhöhe hat sich zwischen der Zeit unmittelbar vor Pumpbeginn und der Zeit der Erholungsmessungen nach Pumpschluß um den Betrag $-S''$ verändert.

Der Anstieg der Druckhöhe erfolgt im allgemeinen nur statistisch entsprechend der Theorie, und auch dies erst ab einiger Zeit nach Pumpschluß, im vorliegenden Falle ab etwa 3 Stunden. Wir haben deshalb die Regressionsgeraden mit den ab 3 Stunden nach Pumpschluß von den einzelnen Pumpversuchen und Beobachtungsstellen verfügbaren je 17–34 Wertepaaren nach den Methoden der mathematischen Statistik ermittelt und geprüft. Die Prüfung der 6 untersuchten Regressionen ergab, daß nach dem Bestimmtheitsmaß B (Quadrat des Korrelationskoeffizienten r) 97 bis 99 % der Veränderungen der Restabsenkung s'' sich aus der Veränderung von $\lg \frac{t' + t''}{t''}$ erklären lassen und daß nach dem Student-t-Verfahren die 99,9 % Sicherheitsgrenzen (Vertrauensschwellen) weiter überschritten werden, die Abhängigkeiten demnach hoch gesichert sind.

Für die Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwertes $k (10^{-3} \text{ m/s})$ nach diesem Verfahren ist für alle Pumpversuche von der totalen, aus Bohrung 3 bekannten Mächtigkeit des Aquifers auszugehen. Der Durchlässigkeitsbeiwert ist nach dem Verfahren von THEIS:

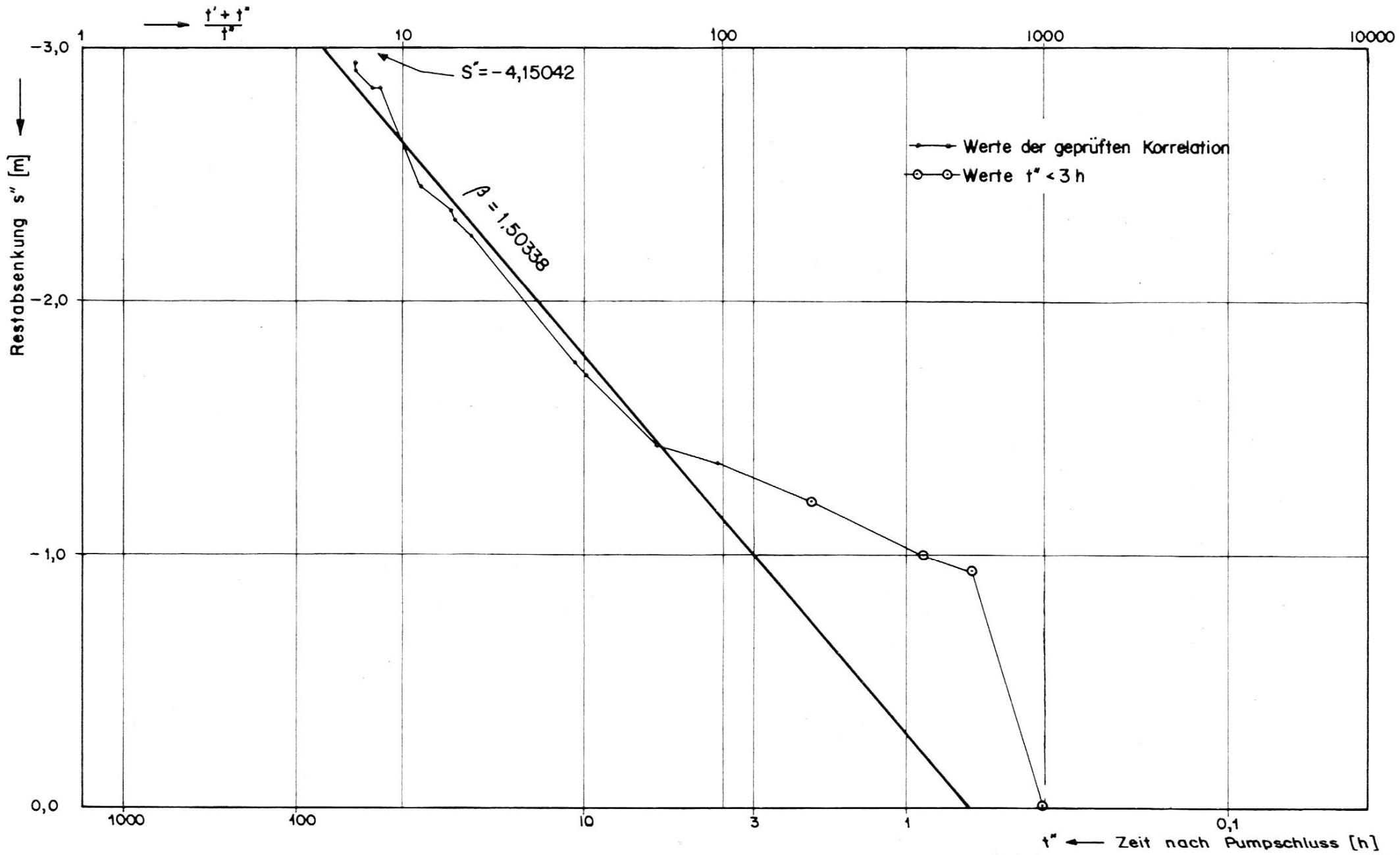
$$k = \frac{q \cdot \ln 10}{4 \cdot \pi \cdot \beta \cdot M}$$

5.42 Durchlässigkeit des Aquifers

Die Regressionsgeraden $s'' = S'' + \beta \lg \frac{t' + t''}{t''}$ zeigen die Gesetzmäßigkeit des Auffüllvorgangs ab etwa 3 Stunden nach Pumpschluß (Beispiele Figuren 16–18).

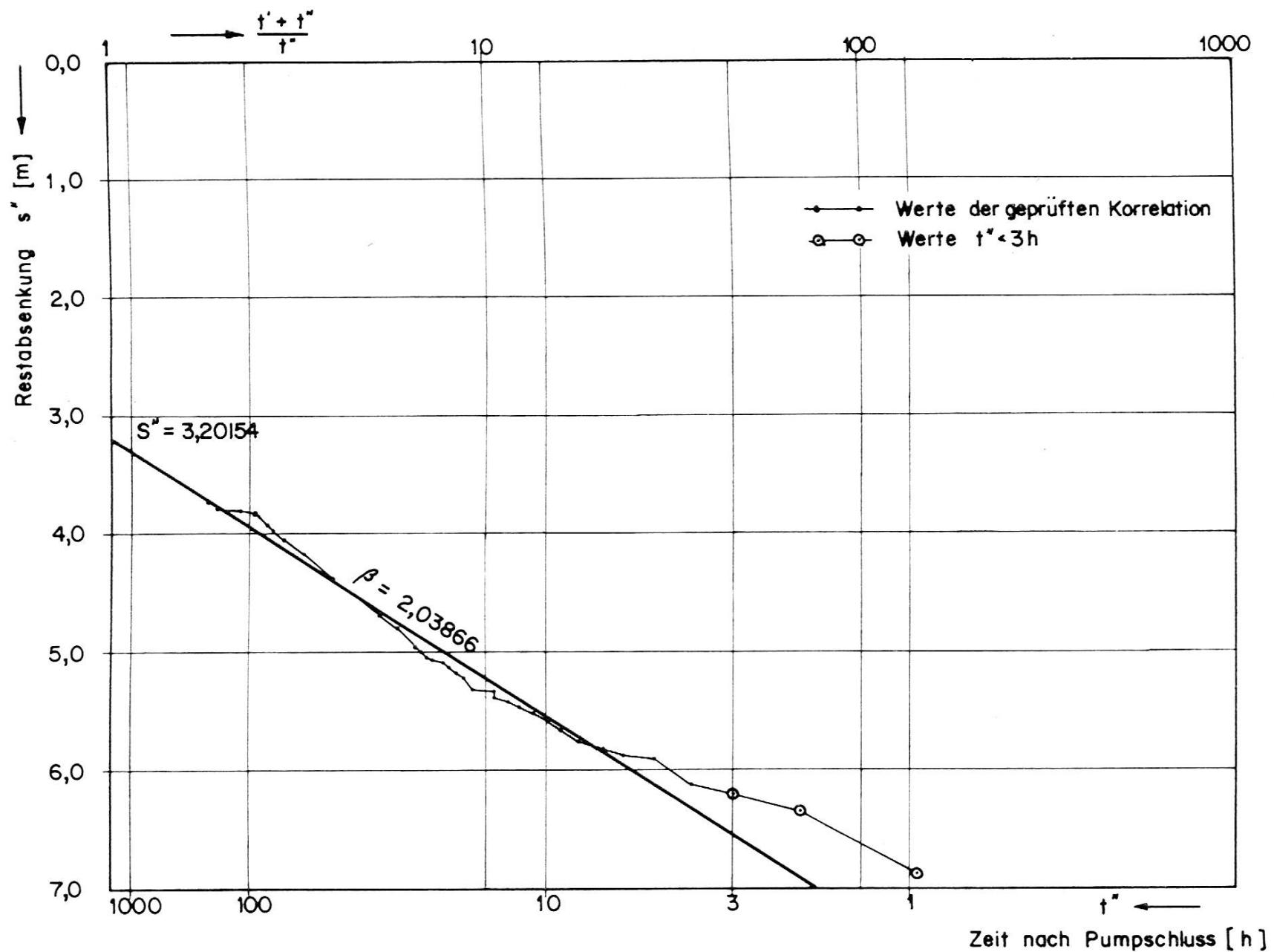
Aus den Regressionsgeraden des Wiederaufstiegs nach Pumpschluß gehen auch die Schwankungen der ungestörten Druckhöhen des Grundwassers

Figur 16
Pumpversuch Bohrung 2
Auffüllvorgang in Bohrung 2 nach Pumpschluss vom 28. Juni 1972



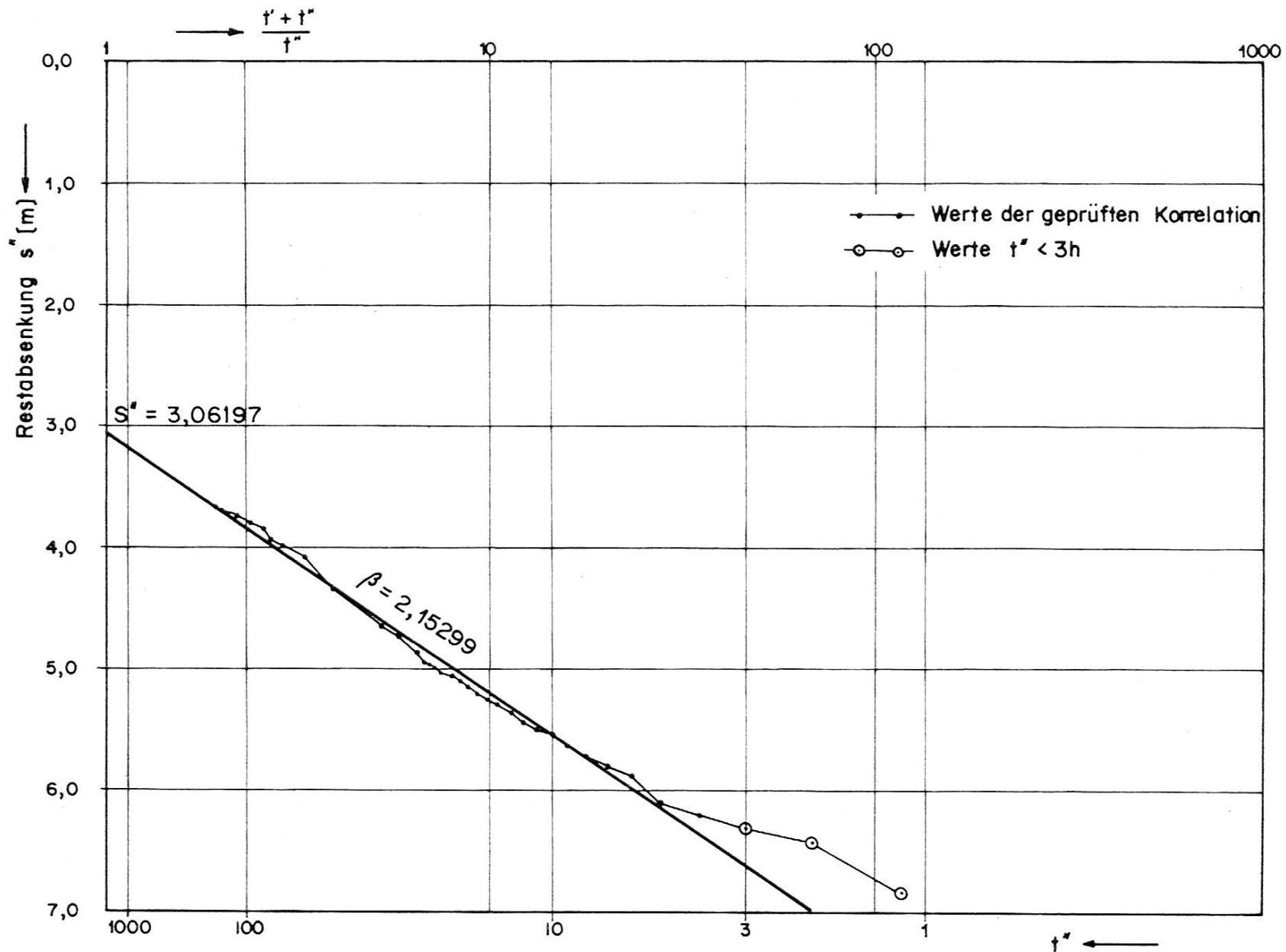
Figur 17
Pumpversuch Bohrung 4

Auffüllvorgang in Bohrung 4 nach Pumpschluss vom 21. Oktober 1973



Figur 18
Pumpversuch Bohrung 4

Auffüllvorgang in Bohrung 2 nach Pumpschluss vom 21. Oktober 1973



hervor. Positive Werte von S'' bedeuten, daß die Druckhöhe ohne weitere natürliche Änderungen bei abgeschlossener Erholung tiefer, negative Werte hingegen, daß sie höher als der Ausgangswasserstand gelegen hätte. In der Zeit während und nach den Pumpversuchen war die Druckhöhe, z. B. beim Pumpversuch aus Bohrung 4, gefallen (Fig. 17/18), währenddem sie bei einem Pumpversuch aus Bohrung 2 angestiegen war (Fig. 16).

Die Verfahren (1) und (2) ergeben bei den nur den Trigonodusdolomit erschließenden Bohrungen 2 und 4 Durchlässigkeitsbeiwerte von etwa $k = 0,002 \cdot 10^{-3}$ m/s (Bohrung 2) und $k = 0,001 \cdot 10^{-3}$ m/s (Bohrung 4) (Tab. 16).

Als zuverlässigste Werte des ganzen, den Trigonodusdolomit und den Hauptmuschelkalk umfassenden Aquifers können die nach Verfahren (3) ermittelten betrachtet werden. Sie ergeben im Streubereich $0,0022 \pm 0,0003 \cdot 10^{-3}$ m/s einen Mittelwert von $k = 0,0023 \cdot 10^{-3}$ m/s (Tab. 16).

Die mittlere Durchlässigkeit ist allgemein sehr gering und im Trigonodusdolomit kleiner als im Hauptmuschelkalk.

Tabelle 16
Bohrungen 2, 3 und 4 (oberer Aquifer)
Förderleistungen, Absenkungen der Druckhöhen und Durchlässigkeitsbeiwerte

Bohrung	Symbol	Dimension	2	4	3
Bohrradius	r	m	0,0714	0,0714	0,1556
Erschlossene					
Grundwassermächtigkeit	M	m	20,50	27,60	99,20
Distanz zum Beobachtungs-					
brunnen Bohrung 2	x	m	—	8,03	8,45
Förderleistung	q	$10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	1,52	2,76	10,0
Absenkung der Druckhöhe im					
Pumpbrunnen	s ₁	m	51,32	147,52	30,76
Absenkung der Druckhöhe im					
Beobachtungsbrunnen	s ₂	m	—	22,95	18,50
Durchlässigkeitsbeiwert nach					
Verfahren	k	10^{-3} m/s			
(1)			0,0018	0,0009	0,0037
(2)			—	0,0006	0,0052
(3) Pumpbrunnen			0,0019	0,0025	0,0024
(3) Beobachtungsbrunnen			—	0,0024	0,0023

5.43 Reichweite der Entnahme und Speicherkoefizient

Die nur aus einem Pumpbrunnen oder aus einem solchen und einem einzigen Beobachtungsbrunnen bekannten Absenkungen ergeben nach den Ver-

fahren (1) und (2) zwar Durchlässigkeitsbeiwerte, die mit den nach Verfahren (3) ermittelten größtenteilsmäßig übereinstimmen. Sie sind aber nicht geeignet, die Reichweiten der Entnahmen mit befriedigender Genauigkeit zu ermitteln.

Die Reichweite R der Entnahme von $q = 10 \text{ l/s}$ aus der die ganze Grundwassermächtigkeit erschließenden Bohrung 3 können wir jedoch aus dem nach dem Verfahren (3) ermittelten Wert $\beta = 7,93$ (Mittel von Pump- und Beobachtungsbrunnen) und aus der bei $x = 8,45 \text{ m}$ beobachteten Absenkung von $s_2 = 18,50 \text{ m}$ nach der Beziehung $2\beta = \frac{s_2}{\lg R - \lg x}$ abschätzen.

Die nach dieser Beziehung für die größte Entnahme ermittelte Reichweite beträgt $R = 124 \text{ m}$. Mit den gleichen Werten und Beziehungen erhalten wir nach den von WIEDERHOLD (1961, 1965) abgeleiteten Formeln einen Speicherkoefizienten des Aquifers von $p = 0,055 = 5,5 \%$, was mindestens größtenteilsmäßig mit Beobachtungen an Aufschlüssen des Oberen Muschelkalks in Einklang steht.

5.5 Beschaffenheit des Wassers

5.51 Temperaturen

Die Temperatur des Wassers, das aus Bohrung 2 mit der bei 80–83 m eingesetzten Pumpe gefördert wurde und aus dem zwischen 259,5 und 280,0 m erbohrten Aquifer stammt, stellte sich bei Entnahmen von etwa $1,5 \text{ l/s} = 90 \text{ l/min}$ auf $27,1\text{--}27,2^\circ \text{C}$ ein.

In dem aus Bohrung 4 geförderten, aus dem Aquifer zwischen 252,6 und 280,0 m stammenden Wasser stellte sich die Temperatur ebenfalls auf $27,1$ bis $27,2^\circ \text{C}$ ein, als mit der bei 156 m eingesetzten Pumpe im Dauerbetrieb $2,76 \text{ l/s} = 166 \text{ l/min}$ entnommen wurden.

Das in Bohrung 3 aus dem Aquifer zwischen 247,0 und 346,2 m mit einer Pumpe bei 295 m Tiefe in einer Menge von $10 \text{ l/s} = 600 \text{ l/min}$ geförderte Wasser hatte im Dauerbetrieb eine Temperatur von $27,4^\circ \text{C}$. Diese Temperatur ist jedoch gegenüber der ursprünglichen durch Abkühlung vermindert. Die bei gleichzeitigem Pumpbetrieb mit 10 l/s in verschiedenen Tiefen des Bohrlochs bis 100 m ausgeführten Messungen ergaben am 4. April 1972 folgende Wassertemperaturen: 40 m: $27,0^\circ \text{C}$, 50 m: $27,3^\circ \text{C}$, 75 m: $27,8^\circ \text{C}$, 100 m: $28,0^\circ \text{C}$.

Im Hauenstein-Basistunnel wurden im Keuper und Muschelkalk des Dottenberg-Südschenkels (unter dem Dottenberg-Nordhang) Gesteinstemperaturen von $21,5 \pm 0,5^\circ \text{C}$ gemessen (BUXTORF 1917). Bei einer mittleren Überdeckung von etwa 400 m und mit dem im Gebiet über diesem Tunnelabschnitt auf rund 800–850 m ü. M. zu etwa $7,5^\circ \text{C}$ zu schätzenden Jahres-

mittel der Temperatur²¹ ergibt sich eine geothermische Tiefenstufe²² von etwa $400 : (21,5 - 7,5) = 28,5 \text{ m} / ^\circ\text{C}$.

Bei den Bohrungen 2–4 von Bad Lostorf liegt das Gelände auf 549 m ü. M. Auf dieser Höhe beträgt die mittlere Jahrestemperatur in der Region etwa $8,0^\circ \text{ C}$.²³ Bei einer geothermischen Tiefenstufe von $28,5 \text{ m} / ^\circ\text{C}$ würde die Temperatur in der mittleren Tiefe des durch Bohrungen 2 und 4 erschlossenen Aquifers etwa $(270 : 28,5) + 8 = 17,5^\circ \text{ C}$ und in der mittleren Tiefe des durch Bohrung 3 erschlossenen Aquifers etwa $(300 : 28,5) + 8 = 18,5^\circ \text{ C}$ betragen. Die tatsächlich mindestens $9,5^\circ \text{ C}$ höheren Wassertemperaturen zwingen zum Schluß, daß das Wasser aus einer größeren Tiefe stammt und sich beim Eintritt in das Bohrloch noch nicht bis auf die Temperatur des umgebenden Gebirges angepaßt hat. Aus der tektonischen Lage des Aquifers ist zu schließen, daß das Wasser von Süden zufließt. Dort liegt der Aquifer unter der Aaretal-Synklinale (Fig. 3) in etwa 650–750 m Tiefe, wo bei einer geothermischen Tiefenstufe von $28,5 \text{ m} / ^\circ\text{C}$ und einer mittleren Jahrestemperatur von $8,0\text{--}8,5^\circ \text{ C}$ Gesteinstemperaturen von $31\text{--}33^\circ \text{ C}$ zu erwarten sind.

5.52 Gelöste Bestandteile

Das aus den Bohrungen 2, 3 und 4 geförderte Wasser des oberen Aquifers (Mineralwasser 3a, 3b, 3c) hat eine erheblich vom Wasser Lostorf 2 (Bohrung 1) abweichende chemische Beschaffenheit. Währenddem das bei Bohrung 1 aus der Tiefe aufsteigende Wasser ein Schwefel- und Natrium-Chlorid-Wasser ist, handelt es sich beim Wasser Lostorf 3 (a, b, c) um ein Schwefel- und Calcium-Magnesium-Sulfat-Wasser. Gegenüber anderen Muschelkalkwässern der Region, die meistens um etwa 10 mg/l Chloride enthalten, ist allerdings der Chloridgehalt mit durchschnittlich 35 mg/l ebenfalls erhöht, ebenso der Natriumgehalt.

Die anlässlich der vier Pumpversuche in insgesamt 36 Proben kontrollierte chemische Zusammensetzung zeigt nur verhältnismäßig geringe Schwankungen (Tab. 17). Die Wässer Lostorf 3a (Bohrung 2) und Lostorf 3c (Bohrung 4), beide aus dem obersten Teil des Aquifers, können als identisch betrachtet werden. Das Wasser Lostorf 3b, welches aus der die ganze Mächtigkeit des Aquifers erschließenden Bohrung 3 gepumpt wurde, ist nur wenig schwächer mineralisiert. Dagegen hat es einen gegenüber den Wässern 3a und 3c weniger als die Hälfte betragenden Schwefelwasserstoffgehalt. Nachdem mit Bohrung 3 in größerer Tiefe ein ergiebiges Thermalwasser erschlossen und deshalb für das Wasser 3 keine große Schüttung mehr angestrebt werden mußte, wurde deshalb die definitive Fassung des

²¹ Allerheiligenberg 890 m $7,5^\circ \text{ C}$, Langenbruck 740 m $6,9^\circ \text{ C}$, Mittel 815 m $7,7^\circ \text{ C}$.

²² Tiefe in m, innerhalb derer beim Eindringen in die Erde eine Temperaturerhöhung um 1° C erfolgt.

²³ Bözberg 571 m $8,1^\circ \text{ C}$, Aarau 408 m $8,4^\circ \text{ C}$ (SCHÜEPP 1960).

Wassers 3 mit Bohrung 4 auf den obersten Teil des Aquifers beschränkt, um im Hinblick auf die balneologischen Zwecke ein möglichst starkes Schwefelwasser zu gewinnen.

Tabelle 17
Mineralwasser 3a-c / Hauptbestandteile

Mineralwasser	3a	3a	3a	3c	3b	3b
Bohrung	2	2	2	4	3	3
Analysen	Mittel	Mittel		Mittel	Mittel	
	6.-13. 9.1971	17.-27. 6.1972	19. 6.1972	16.-21. 8.1973	28.3.- 7.4.1972	4. 4.1972
	LIB	LIB	Hö + Se	LIB	LIB	Hö + Se
mg/l						
Natrium Na ⁺	36	24,9	25	23	28,8	30,0
Kalium K ⁺	13,4	4,0	4,7	4,2	5,7	4,4
Magnesium Mg ²⁺	102,3	129,0	130	123	129,0	126
Calcium Ca ²⁺	530,1	499,9	501	491,0	416,8	462
Eisen Fe ²⁺	0	0,4	1,7	0,3	0,8	0,5
Total Kationen	681,8	658,2	662,4	641,5	581,1	622,9
Chlorid Cl ⁻	29,1	35,2	48	35,6	37,3	44,3
Hydrogenkarbonat HCO ₃ ⁻ .	262	240	262	251	240	287
Sulfat SO ₄ ²⁻	1530	1580	1507	1579	1345	1390
Total Anionen	1821,1	1855,2	1817	1865,6	1622,3	1721,3
Gesamtkonzentration	2502,9	2513,4	2479,4	2507,1	2203,4	2344,2
mval/l						
Natrium Na ⁺	1,57	1,08	1,09	1,00	1,25	1,30
Kalium K ⁺	0,34	0,10	0,12	0,11	0,15	0,11
Magnesium Mg ²⁺	8,41	10,61	10,70	10,10	10,61	10,36
Calcium Ca ²⁺	26,45	24,95	25,00	24,50	20,80	23,05
Eisen Fe ²⁺	0,00	0,01	0,06	0,01	0,03	0,02
Total Kationen	36,77	36,75	36,97	35,72	32,84	34,84
Chlorid Cl ⁻	0,82	0,99	1,35	1,00	1,05	1,25
Hydrogenkarbonat HCO ₃ ⁻ .	4,30	3,94	4,30	4,12	3,93	4,71
Sulfat SO ₄ ²⁻	31,85	31,60	31,34	32,87	28,00	28,91
Total Anionen	36,97	36,53	36,99	37,99	32,98	34,87

LIB = Analysen Lebensmittelinspektorat Baselland.
Hö + Se = Analysen Prof. Dr. O. HöGL und Dr. H. SENFTEN.

Tabelle 17 (Fortsetzung)

Mineralwasser	3a 2	3a 2	3a 2	3c 4	3b 3	3b 3
Bohrung	Mittel 6.-13. 9.1971	Mittel 17.-27. 6.1972	Mittel 19. 6.1972	Mittel 16.-21. 8.1973	Mittel 28.3.- 7.4.1972	Mittel 4. 4.1972
Analysen	LIB	LIB	Hö + Se	LIB	LIB	Hö + Se
<i>mval-%</i>						
Natrium Na ⁺	4,3	2,9	3,0	2,8	3,8	3,7
Kalium K ⁺	0,9	0,3	0,3	0,3	0,5	0,3
Magnesium Mg ²⁺	22,9	28,9	28,9	28,3	32,3	29,7
Calcium Ca ²⁺	71,9	67,9	67,6	68,6	63,3	66,2
Eisen Fe ²⁺	0,0	0,0	0,2	0,0	0,1	0,1
Total Kationen	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Chlorid Cl ⁻	2,2	2,7	3,7	2,6	3,2	3,6
Hydrogenkarbonat HCO ₃ ⁻ .	11,6	10,8	11,6	10,9	11,9	13,5
Sulfat SO ₄ ²⁻	86,2	86,5	84,7	86,5	84,9	82,9
Total Anionen	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Schwefelwasserrstoff mg/l ..	30,2	24,2	37	23,7	9,9	16

LIB = Analysen Lebensmittelinspektorat Baselland.

Hö + Se = Analysen Prof. Dr. O. HöGL und Dr. H. SENFTEN.

5.53 Kohlensäuregehalt

Aufgrund des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts ergibt sich unter Berücksichtigung der Ionenaktivität (zusammenfassende Darstellung des Verfahrens bei MATTHESS 1973) im Mineralwasser 3a vom 19. Juni 1972 ein Gehalt an zugehöriger Kohlensäure von 5,34 mval/l = 117 mg/l und ein Gleichgewichts-pH = 6,46. An Ort und Stelle wurden im Wasser am gleichen Tage 70,6 mg/l freie Kohlensäure und pH = 6,85 gefunden. Der gegenüber den berechneten Gleichgewichtszuständen niedrigere Gehalt an freier Kohlensäure und höhere pH-Wert weisen darauf hin, daß das Wasser zumindest bei seinem Ausfluß aus der Steigleitung nicht im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht ist, sondern zur Kalkfällung neigt. Auf die mögliche Ursache eines solchen Ungleichgewichtes in einem aus großer Tiefe stammenden Wasser kommen wir bei der Besprechung des Mineralwassers 4 zurück.

5.54 Freies Quellgas

Das gepumpte Wasser enthält freies Quellgas in Form feiner Bläschen. Beim Pumpversuch aus Bohrung 4 (Mineralwasser 3a) wurde die Menge des

Quellgases in gleicher Weise wie bei Auslaufversuchen aus Bohrung 3 (Mineralwasser 4) überwacht (vgl. Ziff. 6.54). Als konstant 2,4 l/s Wasser gepumpt wurden, schwankte das dabei ermittelte Gasvolumen zwischen 1,8 und 5,3 cm³/l. Nach der Untersuchung im Massenspektrometer (vgl. Ziff. 6.54) handelt es sich wie beim freien Quellgas des Mineralwassers 4 (Bohrung 3) um Stickstoff. Das Auftreten des freien Quellgases ist im Prinzip in gleicher Weise wie für das Mineralwasser 4 zu erklären (vgl. Ziff. 6.54).

5.55 Bakteriologie

Das aus der definitiven Fassung (Bohrung 4) gepumpte Mineralwasser 3c hatte Keimzahlen (Nähragar, 30° C) von 4–50. In allen Proben der drei Mineralwässer waren weder coliforme Bakterien noch Enterococcen nachweisbar. Eine bakterielle Verunreinigung ist schon angesichts des hohen Alters des Wassers auszuschließen (vgl. Ziff. 7.1). Die festgestellten Keime gehören zweifellos zur autochthonen Bakterienflora des Schwefelwassers.

5.6 Nutzungsmöglichkeiten

Aus den Pumpversuchen ergibt sich zusammenfassend folgendes: Wenn das Mineralwasserstockwerk in seiner gesamten Mächtigkeit erschlossen würde, wie dies in Bohrung 3 vorübergehend der Fall war, könnten im Dauerbetrieb mindestens 10 l/s = 600 l/min gefördert werden.

Nach Versuchen in den Bohrungen 2 und 3 stand jedoch fest, daß bei gleichbleibender Mineralisation ein etwa doppelt so hoher Schwefelwasserstoffgehalt erzielt werden kann, wenn wie in Bohrung 2 nur der oberste Teil der das Mineralwasser enthaltenden Schichtenfolge erschlossen wird. Nachdem die Bohrung 3 in einem tieferen Stockwerk ein anderes ergiebiges, aber mineralärmeres und schwefelwasserstofffreies und daher für die meisten Anwendungen geeigneteres Thermalwasser (Mineralwasser 4) gebracht hatte, benötigte das Bad Lostorf keine großen Mengen des Mineralwassers 3. Nun war eindeutig geboten, für das schwefelwasserstoffhaltige Thermalwasser (Mineralwasser 3) einen möglichst hohen Gehalt anzustreben. Wir beschränkten uns deshalb darauf, das Mineralwasser 3 mit der Bohrung 4 nur im höchsten Teil seines Vorkommens definitiv zu fassen. Aus der definitiven Fassung (Bohrung 4) konnten versuchsweise 2,76 l/s = rund 170 l/min im Dauerbetrieb gepumpt werden.

Die Beschaffenheit des im höchsten Teil seines Vorkommens erschlossenen Mineralwassers 3 (3a, 3c) hat eine hohe Konstanz. Das Wasser ist von Natur aus hervorragend gegen Verunreinigungen geschützt.

6. Mineralwasser Lostorf 4

6.1 Fassung

Die Möglichkeit, daß Wasser in die zur Fassung ausgebauten Bohrung 3 zufließen kann, ist unter den bis 530 m eingebauten und zementierten Futterrohren $\varnothing 8\frac{1}{8}''$ (219 mm) in der bis 582,80 m mit Filterrohren $\varnothing 150$ mm versehenen Bohrung $\varnothing 7\frac{1}{8}'' = 194$ mm (bis 534 m $10\frac{1}{8}'' = 270$ mm) offen gelassen.

Dem Continuous Flow Meter Log der Firma Schlumberger ist jedoch zu entnehmen, daß das artesische Wasser erst ab 571,0 m zufließt. Oberhalb 571,0 m bleibt die Geschwindigkeit des im Filterrohr aufsteigenden Wassers konstant; oder sie nimmt zum Teil sogar etwas ab, da wechselnde Anteile des Wassers im Ringraum zwischen Filterrohr und Bohrlochwandung hochsteigen können. Etwa 80 % des Wassers fließen zwischen 571,0 und 577,8 m zu. Die Teufen unter 577,8 m liefern noch etwa 20 % des Zuflusses. In diesem tiefsten Bereich zeigten die Geräte eine hohe Turbulenz des Wassers an.

6.2 Auslauf- und Pumpversuche

Bei Bohrung 3 wurden an insgesamt 115 Tagen zahlreiche Versuche mit freiem und mit gedrosseltem Auslauf des artesischen Wassers, ferner einige Pumpversuche mit Absenkung der Druckhöhe unter Bohrlochkopf durchgeführt.

6.3 Beziehungen zwischen Auslaufmengen und Druckhöhen (vgl. Fig. 19)

Nach dem spontanen artesischen Auslauf vom 19. Mai 1972 ergab eine erste Messung, als der Auslauf 6,75 h unterbrochen war, am 24. Mai 1972 einen Überdruck von 1,5 at. Wahrscheinlich war dieser aber infolge der vorangegangenen Ausläufe bereits vermindert. Aus den weiteren Ausläufen resultierte bis zum 2. Juni 1972 bei gleichzeitigem, auf 3,1 l/s gedrosseltem Auslauf eine Druckentlastung bis hinunter auf 0,67 at.

Mit einem konstanten gedrosselten Auslauf von 2 l/min konnte dann der Überdruck mit kleinen Schwankungen bis 9. Juni 1972 (Fig. 19) auf 0,67 at gehalten werden. Nach verschiedenen anderen Versuchen zeigte ein mit 16,6 l/s begonnener Auslauf erstmals, daß sich der Druck nicht halten läßt, wenn mit derart großen Auslaufmengen begonnen wird. Der nach einem Unterbruch auf 0,25 at erholte Überdruck konnte jedoch gehalten werden,

als der Auslauf bis zum 16. Juni 1972 (Fig. 19) während 74 h nur mit etwa 4,6 l/s betrieben wurde. Nach einem weiteren Versuch mit anfänglich größerer Auslaufmenge, die zu einem völligen Zusammenbruch des Überdrucks geführt hatte, und nach einem weiteren Unterbruch lag der Überdruck am 17. Juni 1972 (Fig. 19) auf 0,28 at. Bei einem anschließend mit 9,2 l/s begonnenen 42,5stündigen Auslaufversuch pendelte sich bis zum 19. Juni 1972 ein Gleichgewicht mit einem Auslauf von 4,8 l/s und einem Überdruck von 0,20 at ein (Fig. 19).

Für Gleichgewichtszustände nach einem durch vorangegangene große Auslaufmengen reduzierten Ausgangsdruck können die Werte vom 9. Juni 1972 (2 l/s, 0,67 at), vom 16. Juni 1972 (4,6 l/s, 0,25 at) und vom 19. Juni 1972 (4,8 l/s, 0,20 at) betrachtet werden. Mit den Werten vom 9. Juni 1972 und 19. Juni 1972 ergibt sich nach dem THIEMSchen Verfahren und der empirischen Reichweiteformel von SICHARDT (vgl. Ziff. 5.41) aus der Abhängigkeit der Auslaufmenge q von der Druckhöhen-Absenkung s durch Iteration ein auf die gesamte erschlossene Grundwassermächtigkeit bezogener mittlerer Durchlässigkeitsbeiwert $k = 0,01257 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ (Fig. 19). Als Absenkungen erhielten wir am 9. Juni 1972 $s = 2,55 \text{ m}$ und am 19. Juni 1972 $s = 7,25 \text{ m}$. Das heißt, daß die maßgebende Ausgangshöhe des Überdrucks rechnerisch $2,55 + 6,7$ oder $7,25 + 2,0 = 9,25 \text{ m}$ Wassersäule $\sim 0,925 \text{ at}$ betragen hatte (Fig. 19).

In einer folgenden Versuchsperiode mit intermittierendem Auslauf zeigte sich, daß nach einem während längeren Unterbrüchen entstehenden Druckaufbau größere Auslaufmengen möglich sind als nach einem nur wenige Stunden dauernden Unterbruch. Ein jeweils beim Auslauf voll abgebauter manometrischer Druck stieg während jeweilen etwa 12stündigen Unterbrüchen auf 0,22–0,28 at an. Bei diesem Druck brachte ein erneuter Auslauf jeweils eine Wassermenge, die anfänglich 23–27 l/s betrug, aber mit fallendem Druck auf 11–12 l/s zurückging (Fig. 19: 4. Juli 1972). Am Schluß des jeweilen 12stündigen Auslaufbetriebs konnten die Auslaufmengen jedoch annähernd im Gleichgewicht gehalten werden. So betrug die Auslaufmenge bei einem vollen Abbau des manometrischen Drucks am 4. Juli 1972 in den letzten zwei Stunden des Auslaufs konstant $11,73 \pm 0,05 \text{ l/s}$ (Fig. 19). Die durchschnittliche Entnahme der ganzen 12tägigen Periode mit den abwechselnd je etwa 12stündigen Ausläufen und Unterbrüchen betrug 7,3 l/s, währenddem es bei einem Auslaufbetrieb mit Intervallen von wenigen Stunden nur möglich gewesen war, durchschnittlich 3,6 l/s zu entnehmen.

Um darüber Auskunft zu erhalten, in welchem Maße größere Wassermengen als mit Auslaufbetrieb durch Pumpen gefördert werden könnten, wurde am 7. Juli 1974 in das Bohrloch eine Saugpumpe eingesetzt. Die mögliche Absenkung des Wasserspiegels unter Bohrlochkopf betrug nur 6,75 m, womit auch die Förderleistung begrenzt war. Die Pumpe mußte aus technischen Gründen intermittierend betrieben werden. Beim einen Versuch vom 8. Juli 1972 pendelte die Entnahmemenge in den letzten $5\frac{1}{2} \text{ h}$

zwischen etwa 13 und 17 l/s und die Absenkung ab Bohrlochkopf zwischen 6,28 und 6,71 m (Fig. 19). Die am Schluß bei einer Absenkung von 6,30 m getätigte Entnahme von 17,0 l/s entsprach ungefähr dem Beharrungszustand. Andere Versuche (z.B. 10. Juli 1972 und 11. Juli 1972, Fig. 19) weisen darauf hin, daß mit einer Absenkung von gegen 6,75 m nach mehrstündigem Betrieb etwa 15–17 l/s gefördert werden können. Die durchschnittliche Entnahme während der ganzen 5,7tägigen Pumpversuchsperiode (inkl. Pumpunterbrüche) betrug 11,6 l/s.

Nach den Pumpversuchen waren Pumpbetrieb und Auslauf während 15 Tagen unterbrochen, wodurch die Druckhöhe auf 1,20 at über Bohrlochkopf anstieg. Der anschließend ungefähr im Halbtagesrhythmus intermittierend während 12 Stunden mit etwa 10 l/s und während 12 Stunden mit durchschnittlich etwa 1 l/s betriebene, im Mittel der 10,5tägigen Periode 5,5 l/s bringende Auslauf ergab einen Druckabfall von 1,20 at auf 0,80 at bei einer gleichzeitigen Auslaufmenge von etwa 10 l/s und auf 0,91 at nach einem 12stündigen Unterbruch (z.B. 6./7. August 1972, Fig. 19).

Stärker wurde der Druck erst reduziert, als bei drei weiteren Versuchen nochmals jeweils mit großen Wassermengen begonnen wurde. Doch konnte der Betrieb bei den einzelnen Versuchen und insgesamt einem Gleichgewichtszustand angenähert werden. Als an den zwei letzten Tagen während je etwa 12 Stunden durchschnittlich 16,1 und 15,2 l/s entnommen wurden, stellte sich der Auslauf bei einem Überdruck von 0,07–0,08 at beide Male am Schluß auf etwa 11–12 l/s ein (9. August 1972 und 10. August 1972, Fig. 19). Im 24-Stunden-Mittel waren an den beiden letzten Tagen 8,0 und 7,6 l/s ausgelaufen.

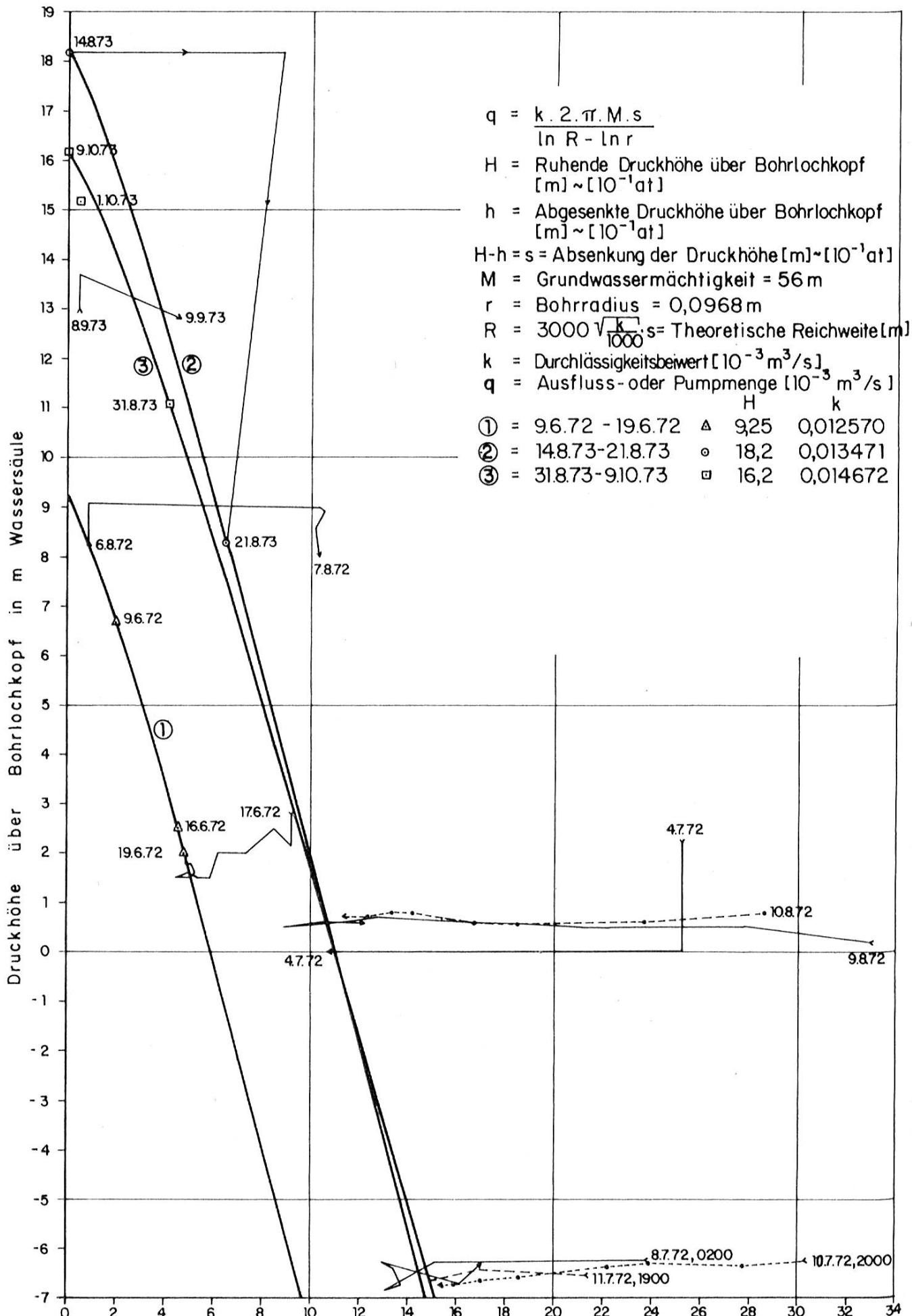
Als am 14. August 1973 erneut mit systematischen Auslaufversuchen begonnen wurde, lag der Überdruck bei 1,82 at (Fig. 19). Durch eine Dauerentnahme von durchschnittlich 7,55 l/s während 7,4 Tagen war der Druck 12 Stunden vor Versuchsschluß (21. August 1973) auf 0,83 at gefallen und blieb dann konstant. Im Mittel der einem Beharrungszustand entsprechenden letzten 5 Stunden flossen bei diesem Druck 6,54 l/s aus (Fig. 19).

Die sich für die Ausflußmenge in Abhängigkeit von der Druckhöhen-Absenkung ergebende Kurve (Fig. 19) verläuft bei größeren Absenkungen durch die bei den Pumpversuchen (Beispiele 8. Juli 1972 und 11. Juli 1972), bei den intermittierenden Auslaufversuchen vom 24. Juni 1972 bis 6. Juli 1972 (Beispiel 4. Juli 1972) und bei den Auslaufversuchen vom 9. August 1972 und 10. August 1972 festgestellten Bereiche des Verhältnisses von Entnahmemenge und Druckhöhe. Dies bestätigt, daß die aus den Werten vom August 1973 abgeleitete Beziehung zwischen Entnahmemenge und Absenkung generell auch für größere Entnahmemengen gültig ist, und weist darauf hin, daß der maßgebende Ausgangszustand der Druckhöhe bereits seit den Versuchen vom 24. Juni 1972 bis 6. Juli 1972 bei etwa 1,82 at gelegen hatte, also gegenüber den früheren Versuchen mit vorangegangenen großen Auslaufmengen und mit kurzrhythmischem intermittierendem Aus-

Figur 19

Bohrung 3, unterer Aquifer

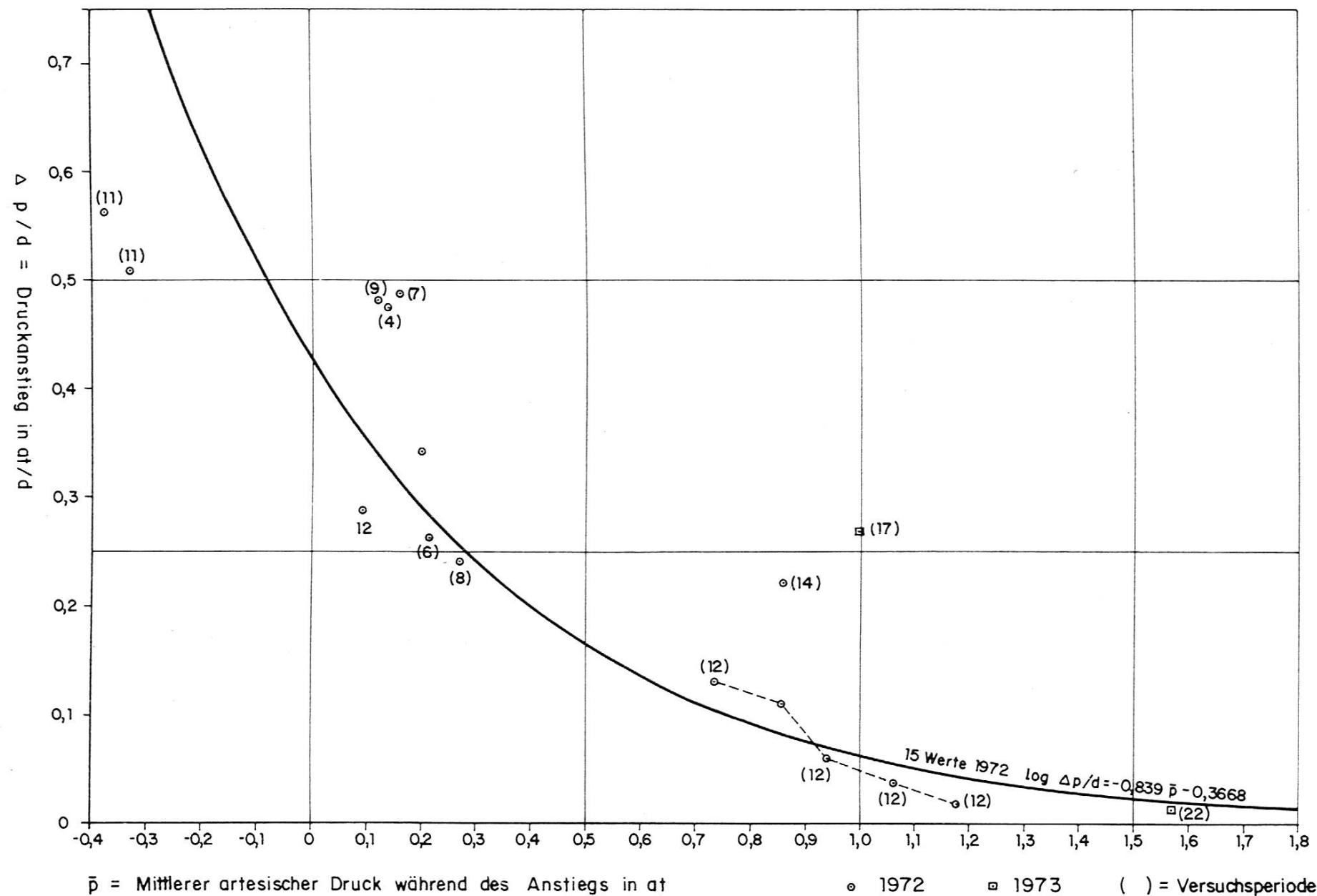
Abhängigkeit der Druckhöhe von der Auslaufmenge



Figur 20

Bohrung 3, unterer Aquifer

Abhängigkeit des Druckanstiegs von der absoluten Druckhöhe



laufbetrieb erhöht war. Für den intermittierenden Betrieb vom 28. Juli 1972 bis 7. August 1972 (Beispiel 6./7. August 1972) liegt die Kurve des je nach Phase wechselnden Wassermengen-Druckhöhen-Verhältnisses bezeichnenderweise ziemlich genau rittlings über der aus den Werten vom 14. und 21. August 1973 abgeleiteten Kurve (Fig. 19).

Nach einem 22stündigen Unterbruch des Auslaufbetriebs hatte sich der Überdruck am 22. August 1973 von 0,83 auf 1,11 at erholt. Mit einem konstanten Auslauf von 4,1 l/s während 8,8 Tagen konnte dieser Druck bis zum 31. August 1973 gehalten werden (Fig. 19). Als der Auslauf zunächst konstant mit geringerer Leistung, dann intermittierend mit durchschnittlich 2,1 l/s und schließlich konstant mit 0,5 l/s betrieben worden war, resultierte bis zum 1. Oktober 1973 (Fig. 19) eine Zunahme des Überdrucks auf 1,52 at. Nach Unterbruch des Auslaufs während 8 Tagen stieg der Überdruck bis zum 9. Oktober 1973 auf 1,62 at an (Fig. 19), war also 0,2 at tiefer als am 14. August 1972.

Die Kurve eines intermittierenden Auslaufbetriebs (Beispiel 8./9. September 1973, Fig. 19) liegt wiederum ziemlich genau rittlings über der aus Beharrungszuständen (bei 0 und 4,11 l/s) abgeleiteten Kurve.

6.4 Durchlässigkeit des Aquifers

Aus den Beziehungen zwischen Auslauf- und Pumpmengen und Druckhöhenänderungen (Fig. 19) ergeben sich auf die Mächtigkeit des ganzen Aquifers bezogen *mittlere Durchlässigkeitsbeiwerte* von

$$k = 0,013 \cdot 10^{-3} - 0,015 \cdot 10^{-3} \text{ m/s},$$

die damit sechsmal größer als die durchschnittlich für den höheren Aquifer (Mineralwasser Lostorf 3) ermittelten sind (vgl. Ziff. 5.42). In Wirklichkeit ist die Durchlässigkeit zweifellos sehr heterogen. Unter den gegebenen Druckverhältnissen fließt Wasser nur im offensichtlich sehr stark durchlässigen Bereich unter 571,0 m zu, wahrscheinlich aus Karsthohlräumen.

6.5 Druckanstiege bei Unterbrüchen des Auslaufs (vgl. Fig. 20)

Die nach Unterbrüchen des Auslaufs beobachteten Druckhöhen zeigen, daß diese im allgemeinen bei kleinen rascher als bei großen absoluten Werten ansteigen. Aus der Zeit vom 13. Juni 1972 bis 8. August 1972 können 15 Druckanstiege während Unterbrüchen des artesischen Auslaufs miteinander verglichen werden. Ihre statistische Auswertung bestätigt eine hoch gesicherte Abhängigkeit des Druckanstiegs Δp von der während der Anstiegszeit herrschenden mittleren absoluten Druckhöhe \bar{p} :

Tabelle 18

Bohrung 3, unterer Aquifer

Statistische Abhängigkeit der Erholung der Druckhöhen bei Unterbruch des artesischen Auslaufs von Druckhöhen

Die halblogarithmische Funktion entspricht im Prinzip dem anzunehmenden Auffüllvorgang. Tatsächlich hört aber der Druckanstieg nicht, wie sich nach dieser Funktion ergäbe, erst bei unendlich großem Druck, sondern bei einem endlichen Wert auf, der in den betrachteten Versuchsperioden von 1972 im Mittel bei etwa 1,4 at gelegen haben dürfte. 1973 lag dieser Wert schätzungsweise etwa 0,4 at höher, weshalb der Druck am 21./28. August 1973 steiler anstieg als 1972 bei vergleichbaren Drücken (Fig. 20).

6.6 Beschaffenheit des Wassers

6.61 Temperaturen

Nach dem Temperatur-Log der Firma Schlumberger hatte das Wasser am 9. Juni 1972 in der Tiefe eine maximale Temperatur von $27,8^{\circ}\text{C}$. Beim Aufstieg kühlte es sich bis zum Bohrlochkopf auf $27,3^{\circ}\text{C}$ ab. Bei großen Auslaufmengen werden am Bohrlochkopf Temperaturen bis $27,4^{\circ}\text{C}$ gemessen.

Mit einer mittleren Jahrestemperatur von $8,0^{\circ}\text{C}$ auf Geländehöhe und mit einer Temperatur von $27,8^{\circ}\text{C}$ des in durchschnittlich etwa 580 m zufließenden Wassers ergibt sich eine geothermische Tiefenstufe von $580 : (27,8 - 8,0) = 29,3 \text{ m} / ^{\circ}\text{C}$. Das Wasser hat demnach eine Temperatur, die einer normalen geothermischen Tiefenstufe entspricht.

6.62 Chemische Beschaffenheit des Wassers (Tabelle 19)

Die Analysen der zahlreichen, in den verschiedenen Versuchsperioden entnommenen Proben belegen, daß das Mineralwasser Lostorf 4 eine ziemlich konstante Mineralisation hat. Zwischen 1972 und 1973 ist bei gleichbleibender Gesamtmineralisation eine leichte Zunahme der Sulfate und eine leichte Abnahme des Hydrogenkarbonats zu verzeichnen. Das Wasser enthält bei einer Gesamtkonzentration von 813–892 mg/l durchschnittlich 62 mval-% Calcium, 34 mval-% Magnesium, 63 mval-% Sulfat und 34 mval-% Hydro-

Tabelle 19
Mineralwasser 4 / Hauptbestandteile*

	Mittel 12.-16.6. 1972	Mittel 17.-19.6. 1972	Mittel 25.6.-6.7. 1972	Analyse HÖGL und SENFTEN 26.6.1972	Mittel 7.-11.7. 1972	Mittel 7.-10.8. 1972	Mittel 16.-20.8. 1973
<i>mg/l</i>							
Natrium	6,5	7,6	7,6	6,9	8,2	4,7	7,0
Kalium	2,7	2,7	2,7	2,4	2,7	2,8	2,5
Magnesium	53,5	52,7	53,3	46,5	50,0	50,0	48,5
Calcium	163,5	151,7	157,0	170,0	135,5	144,5	137,6
Eisen	2,5	1,4	1,0	0,8	—	0,7	5,3
Mangan	0,2	0,3	0,1	0,1	—	0,1	0,1
Total Kationen ...	228,9	216,4	221,7	226,7	196,4	202,8	201,0
Fluorid	1,6	1,6	1,6	1,5	—	1,8	—
Chlorid	7,2	7,1	10,0	11,7	9,8	5,2	8,7
Hydrogenkarbonat	270	267	264	270	270	265	212
Sulfat	384,0	378,7	394,5	380	371,0	338,0	403,4
Total Anionen ...	662,8	654,4	670,1	663,2	650,8	610,0	624,1
Gesamt- konzentration ...	891,7	870,8	891,8	889,9	847,2	812,8	825,1
<i>mval/l</i>							
Natrium	0,28	0,33	0,33	0,30	0,36	0,20	0,30
Kalium	0,07	0,07	0,07	0,06	0,07	0,07	0,06
Magnesium	4,40	4,33	4,38	3,83	4,11	4,11	3,99
Calcium	8,16	7,57	7,83	8,48	6,76	7,21	6,87
Eisen	0,09	0,05	0,04	0,03	—	0,03	0,19
Mangan	0,01	0,01	0,00	0,00	—	0,00	0,00
Total Kationen ...	13,01	12,36	12,65	12,70	11,30	11,62	11,41
Fluorid	0,08	0,08	0,08	0,07	—	0,09	—
Chlorid	0,20	0,20	0,28	0,33	0,28	0,15	0,25
Hydrogenkarbonat	4,43	4,37	4,33	4,43	4,43	4,35	3,48
Sulfat	7,99	7,88	8,21	7,90	7,72	7,04	8,40
Total Anionen ...	12,70	12,53	12,90	12,73	12,43	11,63	12,13
<i>mval-%</i>							
Natrium	2,2	2,7	2,6	2,4	3,2	1,7	2,6
Kalium	0,5	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6	0,5
Magnesium	33,8	35,0	34,6	30,1	36,4	35,4	35,0
Calcium	62,7	61,2	61,9	66,8	59,8	62,0	60,2
Eisen	0,7	0,4	0,3	0,2	—	0,3	1,7
Mangan	0,1	0,1	0,0	0,0	—	0,0	0,0
Total Kationen ...	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Fluorid	0,6	0,6	0,6	0,5	—	0,8	—
Chlorid	1,6	1,6	2,2	2,6	2,3	1,3	2,1
Hydrogenkarbonat	34,9	34,9	33,6	34,8	35,6	37,4	28,7
Sulfat	62,9	62,9	63,6	62,1	62,1	60,5	69,2
Total Anionen ...	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

* Mittel je 2–5 Analysen des Lebensmittelinspektorats Baselland.

genkarbonat-Ionen. Der Chlorid-Gehalt ist wie in normalen Grundwässern des Oberen Muschelkalks niedrig. Mit solchen Grundwässern hat das Wasser einen erhöhten Fluorid-Gehalt gemeinsam, der 1,5–1,8 mg/l beträgt.

6.63 Kohlensäure- und Sauerstoffgehalt

Freie Kohlensäure wurde durch direkte Bestimmungen an Ort und Stelle in Konzentrationen zwischen 27 und 41 mg/l gefunden. Für die eingehend untersuchte Probe vom 26. Juni 1972 errechnet sich nach TILLMAN unter Berücksichtigung der Ionenaktivität (MATTHESS 1973) eine Gleichgewichtskonzentration von 51 mg/l. Nach LANGELIER wäre das ebenfalls unter Berücksichtigung der Ionenaktivität berechnete Gleichgewichts-pH = 6,85, währenddem am 26. Juni 1972 ein pH = 7,0 gemessen wurde. Sowohl die gegenüber der Gleichgewichtskonzentration niedrigeren Kohlensäuregehalte als auch das gegenüber dem Gleichgewichtswert niedrigere pH lassen darauf schließen, daß das Wasser an Kohlensäure untersättigt und daher nicht kohlensäureaggressiv ist, sondern eher zu Kalkausscheidungen neigt. Da das Löslichkeitsprodukt des Calciumkarbonats mit wachsendem Druck zunimmt (ENGELHARDT 1973), muß dieses Ungleichgewicht allerdings in dem in der Tiefe unter einem Druck von gegen 60 at stehenden Wasser nicht zutreffen; doch kann hierüber mangels experimenteller Daten nichts Quantitatives ausgesagt werden.

In mehreren Proben wurde kein Sauerstoff gefunden. Vermutlich ist auch der in anderen Proben gefundene Sauerstoff erst beim Ausfließen des Wassers aus der Atmosphäre aufgenommen worden. Denn die Abwesenheit von Nitrat und die erhöhten Eisengehalte zwingen ebenfalls zum Schluß, daß das aus der Tiefe aufsteigende Wasser keinen Sauerstoff enthält.

6.64 Freies Quellgas

Das am Bohrlochkopf austretende Wasser enthält freies Quellgas in Form feiner Bläschen. Eine Untersuchung des Gases mit dem Massenspektrometer im Institut für anorganische Chemie der Universität Basel ergab, daß es sich um Stickstoffgas handelt. Andere Gase konnten nicht festgestellt werden.

Die Menge des Quellgases wurde bei einigen Versuchen dadurch überwacht, daß das Volumen des aus dem Wasser entwichenen und in der Spitze eines umgekehrten IMHOFFSchen Sedimentationstrichters angesammelten Gases gemessen wurde. Die maximalen Werte betrugen 3–4 cm³/l. Während der Auslaufversuche wurde jeweilen bei abnehmendem Überdruck eine Abnahme des Quellgasgehaltes festgestellt.

Für das Quellgas ist eine Herkunft aus dem das Grundwasser speisenden Meteorwasser (vgl. Ziff. 8.11) anzunehmen. Das Einzugsgebiet des Mineralwassers liegt auf etwa 700–800 m ü. M. Die mittlere Temperatur liegt dort bei etwa 8° C, und nach der barometrischen Höhenformel (SCHMASSMANN

1949, 1956) beträgt der Luftdruck auf dieser Höhe etwa 670 Torr. In einem Liter Wasser werden bei einer Temperatur von 8°C 24,19 mg/l Stickstoff gelöst, wenn der Gesamtdruck (Partialdruck des Gases + Sättigungsdruck des Wassers) 760 Torr beträgt. Mit einem Luftdruck von 690 Torr und mit 78,1 % Volumenprozenten Stickstoff in der Luft ergibt sich, daß im versickernden Wasser etwa 17,15 mg/l Stickstoffgas gelöst sind.

Da die versickernden Oberflächenwässer Stickstoff auch in anorganisch und organisch gebundener Form, meistens vor allem als Nitrate enthalten, im Mineralwasser aber Nitrat nicht nachweisbar ist, ergibt sich, daß der ursprünglich gebundene Stickstoff durch denitrifizierende Bakterien zu elementarem Stickstoff reduziert worden ist. Bei diesem Vorgang entstehen zum Beispiel aus 10 mg/l Nitrat 2,26 mg/l Stickstoff. Mit dem direkt aus der Luft gelösten Anteil von etwa 17,15 mg/l können also im Wasser, je nach dem ursprünglichen Gehalt an gebundenem Stickstoff, gegen 20 mg/l oder auch etwas mehr Stickstoffgas gelöst sein.

Die Löslichkeit des Gases wird mit zunehmender Temperatur kleiner, mit zunehmendem Druck aber größer. Bei dem in der Tiefe herrschenden Druck bleibt das Stickstoffgas trotz der erhöhten Temperatur zweifellos in Lösung. Im aufsteigenden Wasser nimmt der Druck jedoch ab. Am Bohrlochkopf beträgt die Temperatur rund 27°C und der Druck entsprechend dem auf 549 m ü. M. nach der barometrischen Höhenformel herrschenden mittleren Luftdruck etwa 710 Torr. Aus der Löslichkeit des wasserdampfgesättigten reinen Gases bei 760 Torr und 27°C von 16,98 mg/l ergibt sich, daß am Bohrlochkopf im Gleichgewicht mit Stickstoffgas 15,86 mg/l und im Gleichgewicht mit der 78,1 % Stickstoff enthaltenden Atmosphäre 12,38 mg/l Stickstoffgas gelöst sein können. Wenn das aufsteigende Wasser z. B. 20 mg/l enthält, müssen daher zur Herstellung des Gleichgewichts bei 27°C gegen 8 mg/l in die Atmosphäre oder rund 4 mg/l in die sich mit Stickstoffgas füllende Spitze des bei den Versuchen benützten Trichters entweichen. Bei einer Abkühlung des Wassers nimmt die Löslichkeit des Stickstoffs wieder zu, so daß dann weniger Gas entweicht. Die nicht unter standardisierten Temperatur- und Druckbedingungen ausgeführten Volumenmessungen des entwichenen Gases können deshalb nur einen Hinweis auf die Größenordnung geben. Da die Dichte des Stickstoffgases bei 27°C und 710 Torr in der Nähe $D = 1$ liegt, ergibt sich, daß aus einem mit 20 mg gelöstem Stickstoff aufgestiegenen Liter Wasser bei 27°C rund 4 cm^3 als Gas entweichen müssen, bis das Gleichgewicht zwischen dem im Wasser gelösten und dem sich über ihm angesammelten Stickstoffgas hergestellt ist. Dies ist die Größenordnung der höchsten tatsächlich gemessenen Werte, so daß der beobachtete Quellgas-Gehalt plausibel ist.

Andere Gase, wie Sauerstoff und Kohlensäure, sind im Wasser entweder nicht oder in einer unter der Gleichgewichtskonzentration liegenden Menge vorhanden, so daß das entweichende Gas ausschließlich aus Stickstoff besteht.

6.65 Bakteriologie

In allen 16 bakteriologischen Proben aus der Zeit von Mai 1972 bis August 1973 waren weder coliforme Bakterien noch Enterococcen nachweisbar.

Als Ursache der auf Nähragar wachsenden Keime, deren Zahl bei 30° C im August 1973 zwischen 2 und 85 pro ml schwankte, ist angesichts des hohen Alters des Wassers (vgl. Isotopen-Untersuchungen, Ziff. 7.1) und der völligen Abwesenheit von Coliformen und Enterococcen eine Verunreinigung sicher auszuschließen. Vielmehr ist an eine Ausschwemmung einer im reinen Wasser des Aquifers gedeihenden autochthonen Bakterienflora zu denken.

6.7 Nutzungsmöglichkeiten

Die Pump- und Auslaufversuche ergaben zusammenfassend folgendes:

Kurzfristig können mehr als $50-100 \text{ l/s} = 3000-6000 \text{ l/min}$ Wasser frei am Bohrlochkopf auslaufen. Bei längerem Betrieb mit vollem Auslauf kommt es jedoch zu einem Druckabfall, wodurch die ohne Pumpen nutzbare Wassermenge geringer wird.

In einem 7tägigen Versuch mit ununterbrochenem gedrosseltem Auslauf war ein Beharrungszustand des Drucks bei einer Auslaufmenge von etwa $6,5 \text{ l/s} = 390 \text{ l/min}$ erreicht.

Als vorteilhafter erwies sich ein halbtägig intermittierender Auslaufbetrieb, bei welchem während der Unterbrüche ein Druckaufbau entsteht. In einem Versuch mit derart intermittierendem Auslauf war es möglich, während 12 Tagen im 24-Stunden-Mittel etwa $7,3 \text{ l/s} = 440 \text{ l/min}$ frei auslaufen zu lassen. Ein kürzerer Versuch mit halbtägig intermittierendem Auslauf ergab bei konstantem Druck im Tagesmittel eine Auslaufmenge von $7,6 \text{ l/s}$. Die Wassermenge, welche durch intermittierenden artesischen Auslauf gewonnen werden könnte, beträgt demnach mehr als $7 \text{ l/s} = 420 \text{ l/min}$. Wahrscheinlich könnte ohne Pumpen eine noch größere Menge genutzt werden, wenn der Druck nicht wie bei den erwähnten Versuchen durch vorherige größere Auslaufmengen schon abgebaut ist.

Größere Wassermengen als durch artesischen Auslauf ließen sich durch Pumpen gewinnen. Während einer rund $5\frac{1}{2}$ tägigen Pumpversuchsperiode, in welcher die Absenkung und damit die Entnahmemenge durch die Saughöhe der Pumpe von etwa 6,75 m beschränkt war, konnten im Mittel $11,6 \text{ l/s} = \text{rund } 700 \text{ l/min}$ Wasser gefördert werden. Dabei war erst etwa 1 % der gesamten Druckhöhe abgesenkt. Die mit einer größeren Absenkung der Druckhöhe durch Pumpen erzielbare Entnahme haben wir nicht getestet, da der Thermalwasserbedarf des neuen Bades zumindest in der ersten Ausbauetappe bereits durch die nachgewiesene Ergiebigkeit gedeckt war. Wir nehmen an, daß die mögliche Ergiebigkeit durch den Zufluß aus dem Einzugsgebiet beschränkt ist. Aufgrund der Wassermenge, die vom Hauen-

stein-Basistunnel 2 km westlich aus der durch Bohrung 3 erschlossenen Schichtenfolge ungenutzt abdrainiert wird (vgl. Ziff. 7.2) und aufgrund der Größe des wahrscheinlichen Speisungsgebietes (vgl. Ziff. 8.1), schätzen wir, daß die ohne Übernutzung des Vorkommens mögliche Entnahme größtenteils etwa $20 \text{ l/s} = 1200 \text{ l/min}$ betragen würde.

Bisher war es dem Bad möglich, sich allein durch den artesischen Auslauf mit ausreichenden Thermalwassermengen zu versorgen. Da der beim Zutritt des Wassers in die Bohrung rund 60 at betragende Druck gerade noch bis etwa 1,8 at über Gelände ansteigt, muß mit Rücksicht auf die im Laufe von Jahren möglichen natürlichen Druckschwankungen allerdings in Betracht gezogen werden, daß dies einmal vorübergehend nicht der Fall sein könnte. Mit einer Pumpe könnte die Versorgung des Bades mit dem schwefelwasserstofffreien Thermalwasser jedoch auch dann sichergestellt werden.

7. Ergänzende Daten zur genetischen Beurteilung der Mineralwässer

7.1 Tritium- und Sauerstoff-18-Bestimmungen

7.11 Meßeinheiten

Tritium ist radioaktiver Wasserstoff (^3H). Als Einheit für kleine Tritiumkonzentrationen wird die Tritium-Einheit (TU = Tritium Unit) benutzt. 1 TU entspricht einer Konzentration von einem Tritium-Atom auf 10^{18} Wasserstoff-Atome. 1 Liter von 1 TU enthält 3,2 pCi Tritium.

Sauerstoff-18 ist ein stabiles Sauerstoff-Isotop (^{18}O). Der Isotopengehalt wird als δ -Wert angegeben. δ ist die relative Abweichung einer Probe von einem Standard (SMOW = Standard Mean Ocean Water) in ‰.

7.12 Meßergebnisse

des Physikalischen Instituts der Universität Bern gemäß Schreiben vom 19. April 1972 und 26. September 1972:

Tabelle 20
Mineralwässer 2, 3a, 3b und 4 Tritium- und Sauerstoff-18-Gehalte

		Datum	Tritium	^{18}O
Lostorf 2	(Mineralwasserbohrung 1, Schwefelloch)	21.6.1972	106 TU	-11,0 ‰
Lostorf 3a	(Mineralwasserbohrung 2) .	19.6.1972	2,2 TU	-10,0 ‰
Lostorf 3b	(Mineralwasserbohrung 3, Oberes Stockwerk)	4.4.1972	≤ 2 TU	-
Lostorf 4	(Mineralwasserbohrung 3, unteres Stockwerk)	19.6.1972	2,6 TU	-10,21 ‰

7.13 Beurteilung des Tritium-Gehalts

Die kosmische Strahlung produziert in der Atmosphäre Tritium, was im Niederschlagswasser etwa 6–10 TU ergibt. Weit größere Mengen wurden seit 1954 durch Wasserstoffbombe-Explosionen erzeugt. 1963/64 stieg der Tritium-Gehalt der Niederschläge auf über 1000 TU. Nach dem Abkommen über den Kernwaffentest-Stop in der Atmosphäre fielen die mittleren Tri-

tium-Gehalte der Niederschläge bis heute gegen 200 TU ab. «Grundwasser, das heute mehr als 200 TU aufweist, muß also (mindestens zum Teil) nach 1962 in den Boden gelangt sein. Bei Grundwasser mit weniger als 100 TU liegt die Vermutung nahe, daß das Wasser (mindestens zum Teil) vor 1963 in den Boden gelangt ist; bei weniger als 50 TU ist dies gewiß. Ist das Wasser aus der Zeit vor 1954, so weist es heute weniger als 5 TU auf» (nach Merkblatt zur Altersbestimmung von Grundwasser mit Tritium des Physikalischen Instituts der Universität Bern vom Juli 1972 und Literaturangaben).

Da die Halbwertszeit von Tritium nur 12 Jahre beträgt, nimmt der Tritium-Gehalt der vor 1954 infiltrierten Wässer mit zunehmendem Alter rasch ab.

Die Tritiumkonzentration des Wassers *Lostorf 3b* von 2 Tritiumeinheiten weist darauf hin, «daß es vor 1954 (erste H-Bomben, durch die größere Tritiummengen erzeugt wurden) in den Boden gelangte. Weiter kann man daraus schließen, daß eine allfällige Beimischung von Wasser, das nach 1961 in den Boden gelangte, höchstens etwa 1 % betragen könnte.» (Dr. U. SIEGENTHALER, Physikalisches Institut der Universität Bern.)

Auch die Wässer *Lostorf 3a* und *Lostorf 4* sind «vor 1954 in den Boden infiltriert. Die zwar geringe, aber noch deutlich meßbare Tritiumkonzentration kann auf zwei verschiedene Wege zustandegekommen sein: entweder handelt es sich um altes Wasser ($\gtrsim 40$ Jahre), das rund 1 % Nachbomben-Niederschläge (nach 1954) enthält; oder es handelt sich um Wasser ziemlich einheitlichen Alters, das zwischen etwa 1946 und 1953 in den Boden eingedrungen ist.» (Dr. U. SIEGENTHALER.)

Nach der Geologie der Vorkommen betrachten wir ein zwischen etwa 1946 und 1953 in den Boden eingedrungenes Wasser wahrscheinlicher als die Beimischung von rund 1 % Nachbomben-Niederschlägen zu einem alten Wasser. Da die beiden Wasservorkommen durch mächtige undurchlässige Schichten voneinander getrennt sind, sich bei den Pump- und Auslaufversuchen als völlig unabhängig erwiesen haben und ihr chemischer Charakter sehr unterschiedlich ist, muß angenommen werden, daß die ähnlichen Tritium- und Sauerstoff-18-Gehalte zufällig sind und auf das in beiden Fällen hohe Alter sowie ähnliche Höhen der Einzugsgebiete zurückzuführen sind.

Die Werte von *Lostorf 2* (Schwefelloch) «sind deutlich verschieden von den andern. Die Tritiumkonzentration zeigt, daß das Wasser mindestens etwa zur Hälfte jung ist (nach 1958). Es könnte sich um eine Mischung von Vorbomben-Wasser mit jüngerem handeln.» (Dr. U. SIEGENTHALER.) Diese Interpretation des Physikers wird durch die übrigen Untersuchungsergebnisse bestätigt: Dem älteren Mineralwasser ist in je nach Witterung und Pumpmenge wechselnden Verhältnissen jüngeres, mineralärmeres Wasser beigemischt (Ziff. 4.5).

7.14 Beurteilung des Sauerstoff-18-Gehalts

Der H_2^{18}O -Gehalt der Niederschläge hängt infolge einer temperaturabhängigen Isotopenfraktionierung bei Verdunstungs- und Kondensationsprozessen von Ort und Zeit ab: Mit zunehmender Entfernung vom Meer (Kontinentaleffekt) sowie mit abnehmender Temperatur und mit zunehmender Höhe (Höheneffekt) wird der ^{18}O -Gehalt geringer. Die Sommerniederschläge haben höhere, die Winterniederschläge niedrigere Gehalte. Dieser Jahresgang tritt aber im unterirdischen Wasser je nach der Speicherfähigkeit des Gesteins nur in abgeschwächter Form oder überhaupt nicht mehr hervor, wodurch Temperatur und Höheneffekt zu einem Kriterium für die Bestimmung der Höhenlage des Einzugsgebiets wird (nach Veröffentlichungen von ZIMMERMANN und ZÖTL sowie OESCHGER und SIEGENTHALER).

Nach DANSGAARD besteht zwischen δ_{18} und der Jahrestemperatur ta die Beziehung $\delta_{18} = 0,70 ta - 13,9\text{‰}$. Die Untersuchung der Abhängigkeit in Niederschlägen schweizerischer Stationen von Coeve (Ajoie) bis Meiringen-Hasliberg ergab, daß die Werte der sechs Stationen mit einer Ausnahme (Mt. Soleil) niedrigere δ_{18} -Werte haben, als sie durch die Gleichung von DANSGAARD gegeben sind, vermutlich wegen des Kontinentaleffekts (SIEGENTHALER et al. 1970). Im Mittel von Coeve und Heimberg mit einer durchschnittlichen Jahrestemperatur von $9,4^\circ\text{C}$ ist z. B. $\delta_{18} = -9,4\text{‰}$, also $2,1\text{‰}$ niedriger als nach DANSGAARD. In Meiringen mit einer mittleren Jahrestemperatur von $8,5^\circ\text{C}$ ist $\delta_{18} = 10,4\text{‰}$, also $2,5\text{‰}$ niedriger; ähnliche Abweichungen ergaben sich für Stationen mit niedrigen Temperaturen. In Grundwässern bei Kaiseraugst, Pratteln und Schönenbuch, bei denen mit einem langfristigen Ausgleich gerechnet werden darf, in deren Einzugsgebieten mittlere Jahrestemperaturen um etwa $9,2^\circ\text{C}$ (mittlere Jahrestemperatur von Binningen 317 m ü. M.) vorkommen, wurden δ_{18} -Werte zwischen $-8,8\text{‰}$ und $-9,1\text{‰}$ gefunden, demnach $1,3$ – $1,6\text{‰}$ weniger als nach DANSGAARD.

Aus dem Wert von $\delta_{18} = -10,2\text{‰}$ des Mineralwassers Lostorf 4 erhalten wir für das sicher im Jura liegende Einzugsgebiet eine mittlere Jahrestemperatur von $7,4^\circ\text{C}$, wenn wir in der DANSGAARDSchen Gleichung die mittlere Abweichung von $-1,5\text{‰}$ berücksichtigen, die in den Grundwässern des rund 25–35 km westnordwestlich Bad Lostorf gelegenen, bezüglich Ozeanität klimatologisch am ehesten vergleichbaren Gebietes gefunden worden ist. Dies ist im Rahmen der möglichen Abweichungen die im Einzugsgebiet des Mineralwassers Lostorf 4 tatsächlich anzunehmende mittlere Jahrestemperatur (vgl. Ziffer 5.51).

Ein Wert um $\delta_{18} = -10,0\text{‰}$ ist jedoch auch erklärbar, wenn wir wie für das Mineralwasser Lostorf 3 ein Einzugsgebiet über dem mesozoischen Sedimentmantel des Aarmassivs in Betracht ziehen wollen. Der Wert $\delta_{18} = -10,0\text{‰}$ des Mineralwassers Lostorf 3a weist allerdings darauf hin,

daß ein solches Einzugsgebiet eine verhältnismäßig niedrige Höhenlage haben müßte. Ein mittlerer Wert von $\delta_{18} = -10,4\text{‰}$ wurde, wie erwähnt, in Meiringen auf 600 m ü. M. gemessen. Zwischen Meiringen und Hasliberg verändert sich δ_{18} um $-0,37\text{‰}/100$ m. Unter Berücksichtigung einer bei gleicher Höhenlage möglichen δ_{18} -Differenz von $\pm 1\text{‰}$ (SIEGENTHALER et al., 1970, für Funtelenquelle bei Meiringen) könnte das Einzugsgebiet für $\delta_{18} = -10,0\text{‰}$ in jener Gegend einerseits nicht höher als etwa 750 m ü. M. sein. Andererseits muß das Wasser wegen seiner in Lostorf vorhandenen Druckhöhe in Höhen über 550 m ü. M. eingespeist werden. Unter diesen Randbedingungen könnten z. B. die Umgebung von Meiringen im Aaretal und Schattdorf im Reußtal als mögliche Speisungsgebiete erwogen werden, wo der nach Norden untertauchende Sedimentmantel des Aarmassivs bis auf 600 m ü. M., im Reußtal sogar bis auf etwa 450 m ü. M. hinunter zutage tritt. Der Sauerstoff-18-Gehalt des Mineralwassers Lostorf 3a steht somit der Annahme einer Herkunft dieses Wassers aus dem Sedimentmantel des Aarmassivs nicht entgegen.

7.2 Wässer im Hauensteinbasistunnel

7.21 Allgemeines

Mit dem Hauensteinbasistunnel sind rund 2 km westlich die gleichen geologischen Strukturen wie mit den Bohrungen Lostorf 2, 3 und 4 durchörtert worden.

7.22 Aquifer des Mineralwassers Lostorf 3

Der Aquifer des Mineralwassers Lostorf 3 ist im Tunnel 1,997–2,136 km ab Südportal angetroffen worden, wobei es zu bedeutenden Wasseraustritten kam, die Temperaturen von 21,4–22,0° C hatten. Im Gegensatz zu den Wässern Lostorf 3 enthalten die Wässer dieses Aquifers im Tunnel keinen Schwefelwasserstoff. Sie haben auch einen wesentlich geringeren Mineralgehalt und haben trotz örtlich größerer Überlagerung eine niedrigere Temperatur als die Wässer Lostorf 3. 1971 wurden sogar Temperaturen von nur 13,4–15,0° C gemessen, währenddem das Wasser von Lostorf 3 in der Tiefe mindestens 28° C hat. Wahrscheinlich werden die Tunnelwässer dieser Zone zumindest im wesentlichen nicht durch aus größerer Tiefe aufsteigende Wässer, sondern durch Infiltrationen gespeist, die in dem über dem Tunnel zum Gelände ausstreichenden Aquifer stattfinden können.

Mit diesem Aquifer des Oberen Muschelkalks (Trigonodusdolomit und Hauptmuschelkalk) ist der nächste vom Tunnel bei km 2,180 bis km 2.242 im Trigonodusdolomit des Kerns der Hauenstein-Antiklinale durchörterte, in den Bohrungen von Bad Lostorf nicht angetroffene Aquifer offenbar in der Tiefe zusammenhängend. Beim Bau des Tunnels kam es auch auf dieser

Tabelle 21
Hauenstein-Basistunnel
Quellen im Faltenjura-Abschnitt von km 1.285 bis km 3.100
 Nach WIESMANN, BUXTORF, FRÖHLICHER und BARTHOLET

Tektonische Struktur	Schichtgruppe	Vorkommen der Schichten im Tunnel m ab Südportal	Wasser-vorkommen im Tunnel ca. m ab Südportal	Art der Wasser-vorkommen	Schüttung l/s	Temperaturen °C	Analysen m ab Südportal
	Unterer Hauptrogenstein	1267–1418	1285–1415	14 Quellen*	12,3*	9,8–11,4* 12,2***	– 1349
	Unterer Dogger Opalinustone	1418–1661	–	–	–	–	–
Dottenberg-	Lias	1661–1704	1680–1700	Infiltrationen von salzig schmeckendem Wasser*	–	–	–
	Keuper	1704–1997	–	–	–	–	–
Südschenkel	Trigonodusdolomit	Aquifer Lostorf 3	1997–2087	1997–2020	2 Quellen*	3,3*	21,4–21,6* 13,4***
	Hauptmuschelkalk		2087–2136	2025–2150	Bedeutende Wasseraustritte*	20,0*	2048 22* 15,0***
	Dolomitzone		2136–2152				2099
	Sulfatzone		2152–2159	–	–	–	–

	Keuper	2159–2180	–	–	–	–	–
Kern und Nordschenkel Hauenstein- Antiklinale	Trigonodusdolomit	2180–2242	2180–2242	Größere Zahl von Quell- austritten*	15,0–20,0*	21*	–
				H ₂ S-Quelle bei 2200 m **		23,0**	–
	Keuper	2242–2275	–	–	–	–	–
	Opalinustone	2275–2314	–	–	–	–	–
	Lias	2314–2416	2420	etwas Wasser aus untersten Bänken	–	–	–
Leutschen- berg-	Oberer Mittelkeuper	2416–2600	2540	etwas Wasser an Mergel-Dolomit- Grenze	–	–	–
	Gipskeuper und Unterer Keuper	2600–2880	–	–	–	–	–
	Trigonodusdolomit	2880–2960	2900–3100	19 Quellen*, Versiegen von Quellen bei Rohr*	35,4*	19,6–24,1*	–
	Aquifer Lostorf 4					26,8***	2960
Südschenkel	Hauptmuschelkalk	2960–3080		4 Quellen mit 5 l/s bei 2950 bis 3000 m (1,1 g/l Trocken- rückstand)**		26,8–28,0**	–
	Dolomitzone	3080–3128	–	–	–	–	–
	Sulfatzone	3128–3321					

* Beim Bau.

** Nach FRÖHLICHER.

*** 17.2.1971.

Tabelle 22
Vergleich der Hauptbestandteile der Mineralwässer Lostorf 3 und 4 und der Wässer
des Hauenstein-Basistunnels

mval/l	Leutschenberg- Südschenkel	Kern- Hauenstein- antiklinale	Dottenberg-Südschenkel			Misch- wasser		
	Oberer Muschelkalk	Trigonodus- dolomit	Haupt- muschel- kalk	Trigonodusdolomit	Haupt- rogenstein			
	Mineral- wasser Lostorf 4	Hauenstein- Basis- tunnel km 2.960 ab Südportal	Hauenstein- Basis- tunnel km 2.239 ab Südportal	Hauenstein- Basis- tunnel km 2.099 ab Südportal	Hauenstein- Basis- tunnel km 2.048 ab Südportal	Mineral- wasser Lostorf 3a	Hauenstein- Basis- tunnel km 1.349 ab Südportal	Hauenstein- Basis- tunnel Misch- wasser Südportal
Natrium + Kalium $\text{Na}^+ + \text{K}^+$	0,36	0,32	0,24	0,15	0,34	1,21	(- 0,22)	0,44
Magnesium Mg^{2+}	3,83	5,10	9,22	3,74	8,64	10,70	0,80	4,60
Calcium Ca^{2+}	8,48	9,16	15,58	7,08	4,66	25,00	3,18	6,80
Total Kationen	12,67	14,58	25,04	10,97	13,64	36,91	3,76	11,84
Chlorid Cl^-	0,33	0,11	0,13	0,02	0,29	1,35	0,06	0,41
Hydrogenkarbonat HCO_3^- ..	4,43	4,74	5,16	5,24	4,94	4,30	3,52	4,38
Sulfat SO_4^{2-}	7,90	9,73	19,75	5,71	8,41	31,34	0,18	7,05
Total Anionen	12,66	14,58	25,04	10,97	13,64	36,99	3,76	11,84
Temperatur °C	27,8	26,8	15,7	15,0	13,4	> 28,0	12,2	-
Schwefelwasserstoff mg/l ...	-	-	0,03	-	-	37	-	-

Analysen Lostorf 4 und 3a: Prof. Dr. O. HöGL und Dr. H. SENFTEN.

Analysen Hauenstein-Basistunnel: Chemisches Laboratorium des Kantons Solothurn, Proben vom 17.2.1971, Analysen-Werte umgerechnet, $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ergänzt, Tunnel-km auf Distanz von Südportal umgerechnet (Originalangaben ab Nullpunkt 0,135 km südlich Nordportal).

Strecke zu bedeutenden Wasseraustritten. Die Mineralisation und die Thermik weisen auf einen geringeren Einfluß von Infiltrationen aus dem darüber liegenden Gebiet als auf der südlicheren Tunnelstrecke hin. Dieses Wasser ist auch schwefelwasserstoffhaltig. Mineralisation und Schwefelwasserstoffgehalt erreichen jedoch, soweit bekannt, nicht die Werte der Mineralwässer Lostorf 3.

7.23 Aquifer des Mineralwassers Lostorf 4

Der Aquifer des Mineralwassers Lostorf 4 ist im Tunnel 2,880–3,080 km ab Südportal angetroffen worden. Beim Bau flossen aus ihm rund 35 l/s Wasser aus, was zu einem weiträumigen Druckabfall führte, so daß Quellen bei Rohr rund 4 km östlich des Tunneltrasses versiegten. Früher lag der tiefste Punkt des ausstreichenden Aquifers am Faltenjura-Nordrand westlich des Tunnels auf etwa 625 m; durch den Tunnel wurde er um etwa 200 m abgesenkt. Gegen die rund 2,0 km entfernte Bohrung Lostorf 3 ist das Druckgefälle aber noch so groß, daß die Druckhöhe dort etwa 140 m über dem heute als Drainage wirkenden Tunnel liegt.

Chemisch und thermisch ist das in den Tunnel austretende Wasser dem aus demselben Aquifer stammenden Mineralwasser Lostorf 4 (Bohrung 3) sehr ähnlich. Die trotz der unmittelbar über dem Tunnel geringen Überdeckung von etwa 350 m bis 28°C ansteigende Temperatur ist damit erkläbar, daß das Wasser von Westen, z.B. aus Richtung von Bad Lostorf, in größerer Tiefe zufließen kann.

7.24 Mengenanteile

Von der Südrampe des Tunnels flossen zur Zeit des Baus maximal 7140 l/min = 119 l/s Quellwasser ab. Gegen Ende des Baus ging der Abfluß auf 4200–4800 l/min = 70–80 l/s zurück (WIESMANN 1917). In jüngerer Zeit betrug die Menge des beim Südportal abfließenden Wassers durchschnittlich 3000–4000 l/min = 50–67 l/s (FRÖHLICHER 1946).

Das Wasser stammt nicht nur aus den besprochenen Aquifern des Oberen Muschelkalks, sondern auch aus Hauptrogenstein-Strecken südlich und nördlich davon. Nach den Analysen vom 17. Februar 1971 sind 32,5 % Hauptrogensteinwasser (Probe von km 1.349), 25 % Wasser der südlichen Muschelkalkstrecke (Mittel der Proben von km 2.048, 2.099 und 2.239) und 42,5 % Wasser der nördlichen Muschelkalkstrecke (Probe km 2.960) eine mögliche Mischung (theoretische Mischung von Tabelle 23).

Bei einer mittleren Schüttung von 60 l/s würden danach 15 l/s Wasser aus dem Oberen Muschelkalk des Dottenberg-Südschenkels und des Hauenstein-Antiklinalkerns, 25,5 l/s aus dem Oberen Muschelkalk des Leutschenberg-Südschenkels (= Aquifer des Mineralwassers Lostorf 4) und 19,5 l/s aus den Hauptrogensteinstrecken ausfließen.

Nur ein kleiner Teil des vom Tunnel aus dem Oberen Muschelkalk des

Tabelle 23
Hauenstein-Basistunnel
Chemismus des Gesamtwassers der Südrampe

	Theore- tische Mischung	Tunnel- drainage Südportal	Differenz	
Gesamthärte mval/l	11,43	11,40	+ 0,03	(0,3 %)
Karbonathärte mval/l	4,44	4,38	+ 0,06	(1,4 %)
Bleibende Härte mval/l	6,99	7,02	- 0,03	(0,4 %)
Sulfat mval/l	7,02	7,05	- 0,03	(0,4 %)
Temperatur °C	19,03	20	- 0,97	(5,1 %)

Leutschenberg-Südschenkels abdrainierten und ungenutzt in einer Menge von schätzungsweise 25 l/s abfließenden Wassers kann heute mit Bohrung Lostorf 3 (Mineralwasser 4) genutzt sein.

8. Genese der Mineralwässer von Bad Lostorf

8.1 Mineralwasser Lostorf 4

Bei der Besprechung der Entstehung der Mineralwässer von Bad Lostorf beginnen wir mit dem einfachsten Fall, dem Mineralwasser Lostorf 4.

8.11 Aquifer und Einzugsgebiet

Das Mineralwasser Lostorf 4 stammt aus einer hydrogeologischen Struktur, deren Grenzen definierbar sind. Die aus dem Oberen Muschelkalk bestehende Schichtplatte des Südschenkels der Leutschenberg-Antiklinale, welche nach Süden einfällt und dort an den undurchlässigen Mittleren Muschelkalk des Kerns der Hauenstein-Antiklinale anstoßt (Fig. 2), bildet den Aquifer. Der Obere Muschelkalk ist senkrecht zu den Schichtflächen gemessen rund 60 m mächtig und besteht ungefähr im oberen Drittel aus Dolomiten, dem Trigonodusdolomit, ungefähr in den unteren zwei Dritteln aus Kalken, den Platten- und den Trochitenkalken, die zusammen als Hauptmuschelkalk bezeichnet werden.

Der mit der Bohrung Lostorf 3 ab 528 m Tiefe erschlossene Obere Muschelkalk tritt 2 km nördlich an die Erdoberfläche, wo er eine auf rund 10 km zusammenhängende, meistens etwa 100–200 m breite Zone (Fig. 1 und 21) bildet. In dieser Zone kann Oberflächenwasser in die durchlässigen Kalke und Dolomite versickern und das in ihnen vorhandene Grundwasservorkommen speisen. Als indirektes Einzugsgebiet sind auch die oberhalb der Zone des Oberen Muschelkalks über undurchlässigen und schlecht durchlässigen Felsschichten gelegenen Hänge (Fig. 21) zu betrachten. Von diesen Hängen kann Wasser oberflächlich oder oberflächennah zufließen und dann mindestens teilweise in den durchlässigen Oberen Muschelkalk versickern. Westlich des Leutschenbergs handelt es sich beim indirekten Einzugsgebiet um die nach Süden zur Hauptwasserscheide Aare/Rhein ansteigenden Hänge. Östlich des Leutschenbergs, wo die Zone des Oberen Muschelkalks auf die Südseite der Hauptwasserscheide wechselt, kann Oberflächenwasser und am Südhang von Geißflue-Barmelweid auch aus den Kalken des Hauptrogensteins (Dogger) austretendes Quellwasser von Norden her über sie hinwegfließen und dabei zum Teil versickern.

Ursprünglich konnte das versickerte Wasser die Schichtplatte des Oberen Muschelkalks bis zu Niveaus füllen, welche durch die tiefsten Punkte ihres oberflächlichen Ausbisses gegeben waren. Diese Niveaus liegen im Osten beim ehemaligen Lorenzenbad nordwestlich Obererlinsbach, wo ein subthermales Wasser austritt, auf etwa 510 m ü. M., steigen nördlich Bad Lostorf

auf etwa 670 m ü. M. an und fallen nach Westen im Tal zwischen Wisen und Zeglingen auf etwa 625 m ü. M. (Fig. 21). Seit dem Durchstoß des Hauenstein-Basistunnels läuft das Wasser aber westlich Bad Lostorf auf etwa 425 m ü. M. aus (Fig. 21). Im wesentlichen entwässert der Aquifer heute wahrscheinlich westlich des Quertals von Rohr gegen den Hauenstein-Basistunnel, währenddem östlich jenes Quertals ein Abfluß gegen Osten anzunehmen ist (Fig. 21).

Zwischen dem Quertal von Rohr und dem Hauenstein-Basistunnel beträgt die Fläche der Zone des Oberen Muschelkalks und der über diese Zone entwässernden Hänge etwa 1,5 km². Eine grobe hydrologische Bilanz bestätigt großenordnungsmäßig ein solches Einzugsgebiet. Wenn wir bei einer mittleren Niederschlagshöhe von etwa 1,2 m/Jahr die mögliche mittlere Versickerungsrate, auf das durchlässige und das über die durchlässige Zone entwässernde Einzugsgebiet bezogen, zu etwa 0,4 m/Jahr schätzen, würden im Mittel rund 20 l/s versickern und unterirdisch nach dem Tunnel entwässern. Die aus dem Oberen Muschelkalk des Leutschenberg-Südschenkels in den Tunnel ausfließende Wassermenge lässt sich zu durchschnittlich etwa 25 l/s schätzen (vgl. Ziff. 7.24). Ein Teil dieses Wassers kann nach Westen zufließen, wo das möglich indirekte Einzugsgebiet aber nur zum Teil gleichermaßen eng wie im Osten an die durchlässige Zone anschließt und deshalb weniger zur Speisung des Grundwassers beitragen kann.

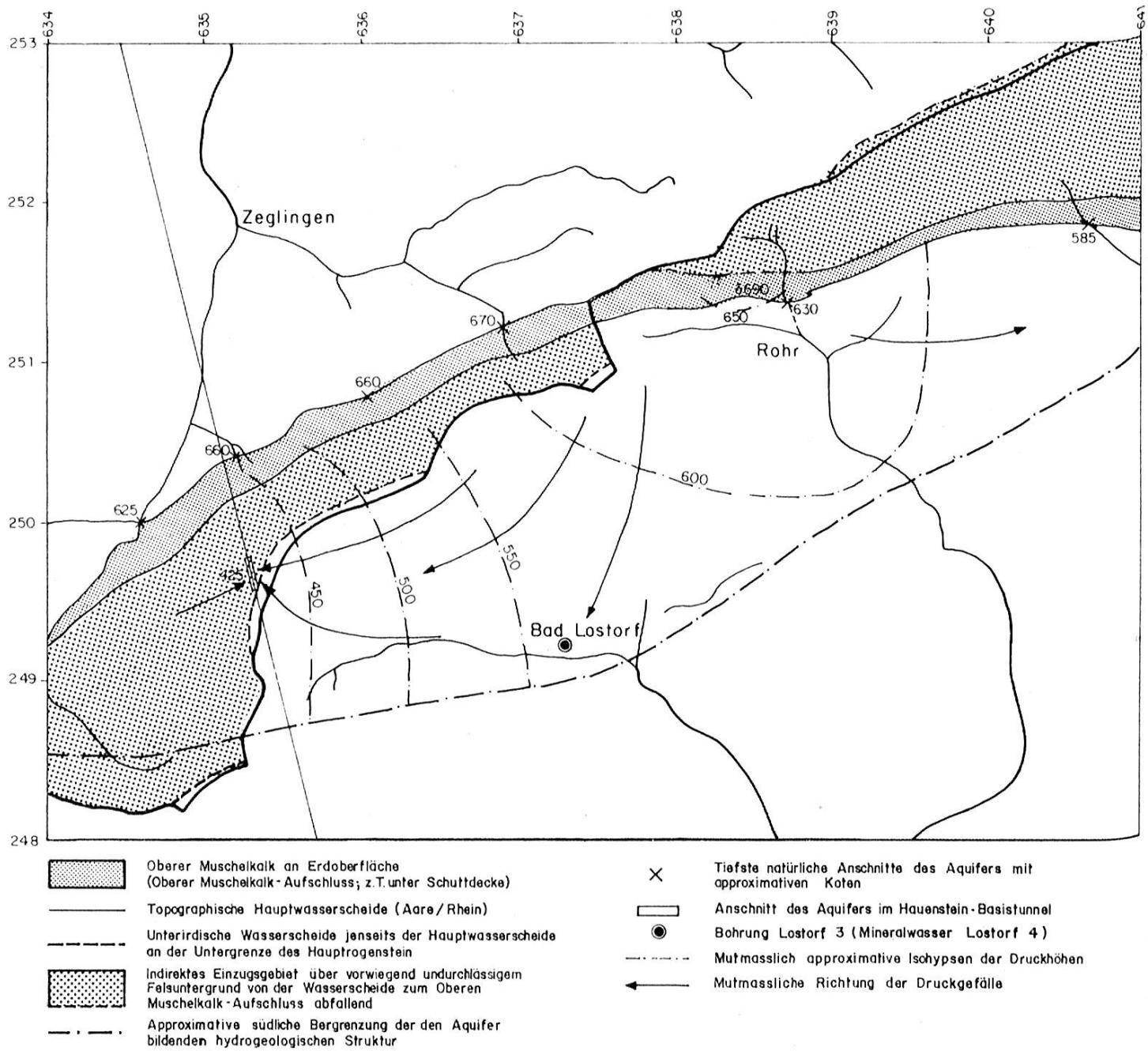
In der nach Süden abtauchenden und mit undurchlässigen Schichten bedeckten Schichtplatte des Oberen Muschelkalks steht das Wasser unter Druck. Vom Gebiet bei Rohr, wo der Aquifer bis etwa 630 m ü. M. gefüllt sein kann, fällt die Druckhöhe bis zu der 2,5 km südwestlich gelegenen Bohrung Lostorf 3 auf etwa 567 m (Bohrlochkopf bei 549 m und 1,8 at artesischer Überdruck), d. h. durchschnittlich etwa 25 m/km (25‰), und muß von da an zum 2 km entfernten Hauenstein-Basistunnel auf etwa 425 m ü. M., d. h. durchschnittlich etwa 70 m/km (70‰) fallen (Fig. 21).

Zumindest der südliche, in die Tiefe abgetauchte und mit der Bohrung Lostorf 3 erschlossene Teil des Aquifers wird nur langsam durchströmt, so daß, wie die Tritium-Gehalte belegen, das Wasser bei Bad Lostorf seit seiner Einspeisung eine Fließzeit von mindestens 18 Jahren hinter sich hat.

8.12 Erwärmung

Das Mineralwasser Lostorf 4 hat bei seinem Zutritt in die Bohrung mit 27,8°C eine Temperatur, wie sie in dieser Tiefe unter Annahme einer normalen geothermischen Tiefenstufe als Gebirgstemperatur zu erwarten ist. Das Wasser hat sich demnach einfach dadurch auf 27,8°C erwärmt, daß es die Temperatur des umgebenden Gebirges annahm.

Figur 21
Hydrogeologische Skizze des Aquifers von Mineralwasser Lostorf 4



8.13 Mineralisationstyp des Muschelkalkwassers

Die Mineralisation des bei Bad Lostorf erschlossenen Wassers ist für ein Grundwasser des Oberen Muschelkalks nicht ungewöhnlich, wie dies aus einem Vergleich mit einigen Wässern dieser Schichtgruppe (nach SCHMASSMANN 1972) hervorgeht:

Tabelle 24
Hauptbestandteile in Grundwässern des Oberen Muschelkalks

mval/l	Ober-dorf BL Boh-rung 3	Buus Quelle Thal	Lostorf Boh-rung 3 (Was-ser 4)	Ober-dorf BL Quelle Kilch-matten	Zeg-lingen Esch-brunnen
Natrium + Kalium $\text{Na}^+ + \text{K}^+$...	0,16	0,21	0,36	0,51	0,34
Magnesium Mg^{2+}	2,95	1,89	3,83	2,95	3,20
Calcium Ca^{2+}	7,15	9,80	8,48	9,90	11,05
	10,26	11,90	12,67	13,36	14,59
Chlorid Cl^-	0,11	0,20	0,33	0,11	0,31
Nitrat NO_3^-	0,10	0,40	0,00	0,10	0,08
Hydrogenkarbonat HCO_3^-	5,30	5,80	4,43	5,20	4,20
Sulfat SO_4^{2-}	4,75	5,50	7,90	7,95	10,00
	10,26	11,90	12,66	13,36	14,59
Gesamtkonzentration mg/l (Hauptbestandteile)	744	874	890	955	1020

Wie andere Muschelkalkwässer hat das Mineralwasser Lostorf 4 auch einen erhöhten Fluorgehalt.

Ausgezeichnet ist das Mineralwasser Lostorf 4 durch seine dank der Tiefe des Vorkommens entstehende Thermalität von etwa 28° C sowie durch den wegen der sehr langen Fließzeit im Untergrund und wegen der 528 m mächtigen Bedeckung hervorragenden Schutz vor Verunreinigungen.

8.14 Ursachen der Mineralisation

Die wichtigsten im Wasser gelösten Bestandteile sind einerseits Calcium und Magnesium und andererseits Sulfat und Hydrogenkarbonat. Diese Bestandteile stammen aus Kalk (Calciumkarbonat), aus Dolomit (Calcium-Magnesium-Karbonat) und aus Gips (Calcium-Sulfat), eventuell aus dem Gips beigemischtem Bittersalz (Magnesium-Sulfat). Calcium- und Magnesium-Hydrogenkarbonat werden zur Hauptsache durch die in den Niederschlägen zum kleineren Teil schon enthaltene, zum größeren Teil aber erst beim

Durchsickern der obersten, meist humusreichen Bodenschichten vom Wasser aufgenommene Kohlensäure aus den Aquifer aufbauenden Kalken gelöst und im Lösungsgleichgewicht gehalten. Die Möglichkeit, daß Kalk und Dolomit gelöst werden und als Calcium-, Magnesium- und Hydrogenkarbonat-Ionen in Lösung gehalten werden, ist durch den Gehalt an der vom Wasser aus der Bodenluft aufgenommenen Kohlensäure beschränkt. Große Mineralkonzentrationen treten deshalb nur dadurch auf, daß auch Gips, welcher ohne Kohlensäure leicht löslich ist, gelöst wird. Gipslager kommen sowohl in der Sulfatzone des Mittleren Muschelkalks unterhalb als auch im Gipskeuper oberhalb des vom Oberen Muschelkalk gebildeten Aquifers vor (Fig. 5). Die den Aquifer von diesen Gipslagern trennenden Schichten, unten die Dolomitzone des Mittleren Muschelkalks, oben der teils ebenfalls dolomitische Untere Keuper (Fig. 5) sind, besonders wenn sie tektonisch bedingte Klüfte enthalten oder schon Lösungsvorgänge stattgefunden haben, nicht völlig wasserundurchlässig, so daß durch sie eine Wasserrückzirkulation vom Aquifer zu den Gipslagern und umgekehrt möglich ist. Zudem kommt im Unteren Keuper selbst schon Gips vor. Da im Einzugsgebiet nicht nur direkt auf dieses gefallene mineralarme Niederschläge versickern, sondern auch Oberflächenwässer, die zum Teil durch Quellen gespeist werden und dadurch bereits gelöste Mineralbestandteile in erheblichen Konzentrationen enthalten können, muß sodann angenommen werden, daß der Mineralgehalt teilweise in dem in den Oberen Muschelkalk eingespeisten Wasser schon vorhanden war.

Die maßgebenden Lösungsvorgänge sind zusammenfassend folgende:

Tabelle 25

Lösungsvorgänge im Oberen Muschelkalk sowie in hangenden und liegenden Schichten

Dolomit	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 + 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 4\text{HCO}_3^-$
Kalk	$\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$
Gips	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$
Bittersalz	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Mg}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 7\text{H}_2\text{O}$

Gips wird z.B. bei 30° C bis zu einer Konzentration von 2,1 g/l (= 30,9 mval/l) gelöst. Untergeordnet enthalten die Gipslager auch Bittersalz, das eine hohe Löslichkeit (408 g MgSO₄/l bei 38° C) hat.

Calcium- und Hydrogenkarbonat-Ionen können nur bis zum sogenannten Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht gelöst und in Lösung gehalten werden. Das Gleichgewicht ist durch die Gleichung $\text{CO}_2 = K \cdot \text{Ca}^{2+} \cdot (\text{HCO}_3^-)^2$ gegeben, wobei K eine aus dem Lösungsprodukt von Calciumkarbonat und den Dissoziationskonstanten der Kohlensäure abgeleitete Konstante ist. Um das gelöste Calcium-Hydrogenkarbonat in Lösung zu halten, muß eine bestimmte, als «zugehörig» bezeichnete Konzentration gelöster Kohlensäure

im Wasser vorhanden sein. Wenn z. B. durch die Lösung von Gips die Calcium-Ionen vermehrt werden, wird ein vorher zwischen diesen, den Hydrogenkarbonat-Ionen und der freien Kohlensäure bestehendes Gleichgewicht gestört. Ein neues Gleichgewicht verlangt, daß die Hydrogenkarbonat-Ionen teils mit Calcium-Ionen zu Kalk (Calciumkarbonat) ausgefällt, teils zu freier Kohlensäure umgewandelt werden. Mit zunehmender Gipslösung nimmt deshalb im allgemeinen die Hydrogenkarbonat-Konzentration ab, der Gehalt an freier Kohlensäure aber zu. Die Magnesium-Ionen bleiben bei diesen Vorgängen unverändert in Lösung.

8.15 Magnesium-Gehalt und Modelle der Lösungsvorgänge

Theoretisch könnte die im Mineralwasser Lostorf 4 vorhandene Lösung zu 4,43 mval/l aus Calciumkarbonat (Kalk), zu 4,05 mval/l aus Calciumsulfat (Gips) und zu 3,84 mval/l aus Magnesiumsulfat (Bittersalz) entstanden sein oder (ohne Berücksichtigung der Nebenbestandteile) hergestellt werden. Ein solches Verhältnis von Magnesiumsulfat zu Calciumsulfat von 1:1,06 übertrifft jedoch den in der Regel höchstens Spuren entsprechenden Magnesiumsulfat-Anteil der in Frage kommenden Gipslager. Auch die überwiegend Calcium-Sulfat enthaltenden, wegen der Lösung von Gipslagern stark mineralisierten Wässer der Region haben ein viel kleineres Magnesium-Calcium-Verhältnis:

Tabelle 26
*Magnesium-Calcium-Verhältnisse in Calcium-Sulfat-Wässern
und im Mineralwasser Lostorf 4*

Wasser	Bad Ramsach	Sissach	Eptingen	Lostorf 4 (Bohrung 3)
Geologie	Mittlerer Muschelkalk	Gips- keuper	Gips- keuper	Oberer Muschelkalk
mval/l				
SO ₄ ²⁻	15,18	31,11	17,99	7,90
HCO ₃ ⁻	3,20	5,18	2,95	4,43
Mg ²⁺	1,03	5,71	3,62	3,83
Ca ²⁺	17,65	30,71	17,40	8,48
SO ₄ ²⁻ : HCO ₃ ⁻	4,7	6,0	6,1	1,8
Mg ²⁺ : Ca ²⁺	0,06	0,19	0,21	0,45
(SO ₄ ²⁻ - Mg ²⁺) : Mg ²⁺ * . . .	15,77	4,45	3,97	1,06

* = theoretisches Salzverhältnis CaSO₄ : MgSO₄.

Das im Mineralwasser Lostorf 4 gegenüber den hauptsächlich Gips enthaltenden Wässern größere Magnesium:Calcium-Verhältnis läßt darauf

schließen, daß ein Teil des Magnesiums aus Dolomit stammt, wie dies auch aus der Geologie zu erwarten ist.

Folgende Modelle zeigen als Extremfälle zwei Möglichkeiten für die Herkunft des Magnesiums und der übrigen Hauptbestandteile des Mineralwas-

Tabelle 27
Mineralwasser Lostorf 4
Modelle über Herkunft der Hauptbestandteile

mval/l	Magne-	Calcium	Hydro-	Sulfat	Kohlen-	Gesamt
	sium		gen-		säure frei,	kohlen-
	Mg ²⁺	Ca ²⁺	karbonat	SO ₄ ²⁺	zugehörig	säure ⁴
<i>Modell 1</i>						
Lösung von Kohlensäure	-	-	-	-	+ 6,73	+ 3,37 ⁵
Lösung von Dolomit (Mg : Ca = 1 : 1)	+ 2,72	+ 2,72	+ 5,44	-	- 5,44	+ 2,72 ⁶
Gleichgewichtswasser nach						
Lösung von Dolomit	2,72	2,72	5,44	0,00	1,29	6,09
Lösung von Gips	-	+ 6,77	-	+ 6,77	-	-
Gleichgewichtsherstellung ¹ . . .	-	- 1,01	- 1,01	-	+ 1,01	- 0,51 ⁷
Lösung von Bittersalz	+ 1,12	-	-	+ 1,12	-	-
Mineralwasser Lostorf 4 ²	3,84	8,48	4,43	7,89	2,30	5,58
<i>Modell 2</i>						
Lösung von Kohlensäure	-	-	-	-	+ 6,73	+ 3,37 ⁵
Lösung von Gips	-	+ 7,89	-	+ 7,89	-	-
Lösung von Dolomit ³	+ 3,84	+ 0,59	+ 4,43	-	- 4,43	+ 2,21 ⁶
Mineralwasser Lostorf 4 ²	3,84	8,48	4,43	7,89	2,30	5,58
<i>Ionen-Verhältnisse</i>						
	Mg : Ca			(SO ₄ - Mg) : Mg		
	Modell 1	Modell 2		Modell 1	Modell 2	
Karbonat-Lösung	1,00	6,51		-	-	
Sulfat-Lösung	0,17	0,00		6,04	∞	
Gleichgewichtsherstellung . . .	- 0,00	-		-	-	
Mineralwasser Lostorf 4	0,45	0,45		1,05	1,05	

¹ Herstellung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts nach Lösung von Calcium-Ionen aus Gips.

² Zum Ausgleich der Kationen-Anionen-Bilanz + 0,01 mval Mg²⁺/l und - 0,01 mval SO₄²⁻/l.

³ Lösung von Dolomit und gleichzeitige Kalkfällung.

⁴ mval HCO₃⁻/l + $\frac{1}{2}$ mval CO₂/l

⁵ Aus Luft (Bodenluft).

⁶ Aus Dolomitgestein (Karbonat).

⁷ Aus Kalk.

sers Lostorf 4. Um dem in der Tiefe größeren, aber nicht genau bekannten Lösungsprodukt des Calciumkarbonats Rechnung zu tragen, berücksichtigen wir als freie Kohlensäure die zu $50,6 \text{ mg/l} = 2,30 \text{ mval/l}$ ermittelte Gleichgewichtskonzentration (vgl. Ziff. 6.7). Dem Modell 1 liegt die Annahme zugrunde, daß zuerst nur Dolomit mit einem Magnesium-Calcium-Verhältnis von 1:1 gelöst wird. Im Modell 2 werden umgekehrt zuerst die Sulfate gelöst und dann Dolomite bei gleichzeitiger Fällung von Kalk. Eine solche Ausfällung von Kalk ist aus Dolomiten des Muschelkalks bekannt und bildet die sogenannten Zellendolomite. In Wirklichkeit werden die Vorgänge weder streng nach Modell 1 noch nach Modell 2 ablaufen, sondern als sukzessive gleichzeitige Lösung von Karbonaten und Sulfaten oder Mischung von hydrogenkarbonat- und von sulfathaltigen Wässern.

Um den Magnesium-Gehalt des Wassers zu erklären, ist es gemäß Modell 2 nicht unbedingt erforderlich, die Lösung von Magnesiumsulfat (Bittersalz) anzunehmen. Nach Modell 1 ergäbe sich für die Sulfat-Lösung ein Magnesium-Calcium-Verhältnis, wie es in den überwiegend durch Lösung von Gips entstandenen Wässern (z. B. Bad Ramsach, Sissach, Eptingen) ebenfalls vorkommt. Dabei ist zu berücksichtigen, daß auch diese Wässer Hydrogenkarbonat enthalten, ihr Magnesium deshalb ebenfalls ganz oder teilweise aus Dolomiten stammt und dadurch allein bei der Sulfat-Lösung ein kleineres Magnesium-Calcium-Verhältnis als z. B. 0,17:1 entstehen kann. Bei der Beurteilung ist sodann zu beachten, daß bei der in den Modellen nicht oder nur bilanzmäßig berücksichtigten Lösung von Kalken das Magnesium-Calcium-Verhältnis zugunsten des Calciums verschoben wird.

Die Modelle und die Vergleiche mit den überwiegend aus Gips entstandenen Wässern geben somit nur einen qualitativen Hinweis auf die Herkunft der Magnesium-Ionen, legen aber dar, daß das Magnesium ganz oder größtenteils auf die Lösung von Dolomiten zurückgeführt werden kann und wahrscheinlich auch zurückzuführen ist.

8.16 Sauerstoffschwund und Eisen

Eine weitere Eigenheit von Grundwässern des Oberen Muschelkalks ist ihre Sauerstoffarmut. Durch den Vergleich der Analysen solcher Wässer und durch experimentelle Untersuchungen (SCHMASSMANN 1947) ist festgestellt, daß diese Sauerstoffarmut eine Folge der Oxidation von zweiwertigem Eisen ist. «Im Kristallgitter des Dolomits findet sich nämlich das Magnesium z. T. durch zweiwertiges Eisen vertreten. Dieses wird bei der Zersetzung des Dolomitgesteins frei. Bei Anwesenheit von Sauerstoff wird es oxidiert, wodurch die vorhandene Menge an Sauerstoff vermindert wird. Da das gebildete Ferrihydroxyd nur schwer löslich ist, fällt es aus» und wandelt sich wegen seiner Instabilität zu Goethit oder Hämatit um (Tabelle 28).

Wenn noch ein Rest von Sauerstoff verbleibt, fällt das Eisen aus und ist deshalb im Wasser nicht mehr vorhanden. Dagegen kann das noch im

Tabelle 28
Lösung und Oxidation des im Dolomit enthaltenen Eisens

$2\text{FeCO}_3 + 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons 2\text{Fe}^{2+} + 4\text{HCO}_3^-$
Eisen Kohlen-	Eisen- Hydrogenkarbonat-
kabonat säure	Ionen Ionen
$2\text{Fe}^{2+} + 4\text{HCO}_3^- + \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$\rightleftharpoons 2\text{Fe(OH)}_3 + 4\text{CO}_2$
Sauer- Eisen-	
stoff hydroxid	
2Fe(OH)_3	$\rightarrow 2\text{FeO(OH)} + 2\text{H}_2\text{O}$
	Goethit
2FeO(OH)	$\rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$
	Hämatit
$2\text{FeCO}_3 + \frac{1}{2}\text{O}_2$	$\rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{CO}_2$

Wasser enthaltene Magnesium, auch wenn es nicht ausschließlich aus Dolomit stammt, ein Maßstab für den in Lösung gegangenen eisenhaltigen Dolomit sein. Statistisch nimmt deshalb der Sauerstoffgehalt in den untersuchten Wässern proportional zur Zunahme des Magnesiumgehaltes ab. Im Mittel ergab sich, daß pro 1 mval in Lösung gegangenes Magnesium etwa 1,6 mg Sauerstoff zur Oxidation von zweiwertigem Eisen verbraucht werden. Dieses Verhältnis würde bei der im Mineralwasser von Lostorf 4 vorhandenen Magnesium-Konzentration von 3,83 mval/l bedeuten, daß 6,1 mg/l Sauerstoff verbraucht würden. Der ursprüngliche Sauerstoffgehalt des versickerten Wassers würde bei Sättigung, einem mittleren Luftdruck von 690 Torr und einer mittleren Temperatur von 8° C 10,4 mg/l betragen, so daß ein Restsauerstoff-Gehalt von 4,3 mg/l verbliebe. Der im Mineralwasser Lostorf 3 tatsächlich totale Sauerstoffschwund kann deshalb allein mit der aus anderen Muschelkalkwässern bekannten Abhängigkeit von der Dolomitlösung nicht erklärt werden und muß noch andere Ursachen haben, z.B. die bei den erhöhten Temperaturen größere Löslichkeit des Eisens.

Infolge des vollständigen Sauerstoffschwunds fehlen auch Nitrate, die unter anaeroben Verhältnissen zu elementarem Stickstoff reduziert werden. Das Fehlen von Sauerstoff hat ferner zur Folge, daß Eisen in zwischen 0,6 und 5,3 mg/l schwankenden Konzentrationen in Lösung sein kann, ferner 0,1–0,4 mg/l Mangan. Die Oxidation von 1 mg/l gelöstem Eisen würde nochmals 0,14 mg/l Sauerstoff benötigen. Bei den Auslaufversuchen machten rostige Beläge in der Ablaufrinne sichtbar, daß diese Oxidation dann im auslaufenden Wasser im Kontakt mit Luft stattfand.

Aus der chemischen Beschaffenheit geht zusammenfassend hervor, daß nicht nur einfache Lösungsvorgänge sondern auch komplizierte chemische Gleichgewichtssysteme zu der schließlich resultierenden Mineralisation des Mineralwassers Lostorf 4 geführt haben.

8.2 Mineralwasser Lostorf 3

8.21 Aquifer und Temperatur

Südlich des Gebietes der Bohrungen 2–4 hatten gebirgsbildende Vorgänge während der Jurafaltung die den Oberen Muschelkalk enthaltende Schichtplatte von ihrer nördlichen Fortsetzung abgespalten und auf diese übergeschoben (Fig. 2 und 3). Dadurch kommt an derselben Stelle, aber in zwei verschiedenen Tiefen, zweimal die gleiche Schichtserie des Oberen Muschelkalks vor. Im abgespaltenen und dann hochgeschobenen südlichen Teil der ehemals zusammenhängenden Schichtplatte, also im Dottenberg-Südschenkel, enthält der Obere Muschelkalk das Mineralwasser Lostorf 3, im nördlichen, in der Tiefe zurückgebliebenen Teil, dem Leutschenberg-Südschenkel, dagegen das Mineralwasser Lostorf 4 (Fig. 2).

Der im Oberen Muschelkalk das Mineralwasser Lostorf 3 führende Dottenberg-Südschenkel steigt von Süden aus der breit angelegten Aaretal-Synklinale auf (Fig. 3).

Aquifer des Mineralwassers Lostorf 3 ist der Obere Muschelkalk des aufgeschobenen Südschenkels der Hauenstein-Antiklinale (Dottenberg-Südschenkel), welcher nach Süden zur breit angelegten Aaretal-Synklinale überleitet. Die Temperatur von mindestens 28°C in nur 250–350 m Tiefe zwingt zum Schluß, daß das Wasser aus einer größeren Tiefe aufsteigt, welche der Aquifer nur südlich von Bad Lostorf haben kann. Ein lokaler oder regionaler Wärmeherd ist auszuschließen; denn unter dem Aquifer des Mineralwassers 3, in dem von ihm durch mächtige undurchlässige Schichten getrennten tieferen Stockwerk hat das Mineralwasser 4 bei 571–580 m eine der normalen geothermischen Tiefenstufe entsprechende Temperatur von $27,8^{\circ}\text{C}$. Das Mineralwasser Lostorf 3 muß also von Süden her zufließen, wo es unter der Aaretal-Synklinale entsprechend der geothermischen Tiefenstufe eine Temperatur von etwa $31\text{--}33^{\circ}\text{C}$ haben, sich im aufsteigenden Wasser aber etwas abkühlen kann.

8.22 Schwefelwässer im südlichen Faltenjura

Alle bekannten schwefelwasserstoffhaltigen Wässer des Faltenjuras kommen in einer ähnlichen geologischen Situation vor. Beim Aquifer handelt es sich immer um den Oberen Muschelkalk im aufgeschobenen und gegen das Molassebecken abfallenden Südschenkel der südlichsten Jurafalte mit einem bis zum Niveau der Erdoberfläche hochgepreßten Trias-Kern. Es sind dies von Ostnordosten nach Westsüdwesten die in Tabelle 29 aufgeführten Wässer.

Bei Baden ist die Lägern-Antiklinale überhaupt die südlichste Jurafalte, und der das Mineralwasser führende Aquifer taucht deshalb direkt zum Molasse-Becken ab. Bei Bad Schinznach ist der Falte, aus deren aufgeschobenem Südschenkel das Wasser stammt, im Süden noch die Chestenberg-

Tabelle 29
Schwefelwässer im südlichen Faltenjura

km west-süd-westlich von Baden	Ort	Struktur des den Aquifer enthaltenden aufgeschobenen Südschenkels	Schwefelwasserstoffgehalt mg/l	Temperatur °C	Schüttung l/s
0	Baden	Lägern-Antiklinale	0,7	46–48	11–16
11,5	Bad Schinznach	Lägern-Antiklinale	50	30	3– 4
30	Lostorf 2	Hauenstein-Antiklinale	bis 141	bis 15,4	0,15
30,5	Lostorf 3a + c	Hauenstein-Antiklinale	37	28	≥ 2,8
	Lostorf 3b	Antiklinale	16		≥ 10
32,5	Hauenstein-Basistunnel	Hauenstein-Antiklinale	+	21–22*	15
39	Belchentunnel	Farisberg-Antiklinale	+	12	≤ 10

* Beim Bau.

Antiklinale, bei Bad Lostorf, beim Hauenstein-Basistunnel und beim Belchentunnel noch die Born-Engelberg-Antiklinale vorgelagert. Die Kerne dieser südlicheren Falten sind jedoch nur mit Dogger in einem Falle und mit Malm im anderen bis zum Niveau der Erdoberfläche hochgepreßt; die Trias mit dem Oberen Muschelkalk ist also in der Tiefe geblieben.

8.23 Hypothetischer Zufluß aus dem Untergrund des Molassebeckens

Nördlich des aufgeschobenen Südschenkels der jeweils südlichsten, einen bis zum Niveau der heutigen Erdoberfläche hochgepreßten Trias-Kern enthaltenden Jurafalten können die Wässer des Oberen Muschelkalks zwar subthermal oder thermal sein, wie das Mineralwasser Lostorf 4, enthalten aber, soweit bekannt, im Faltenjura nie Schwefelwasserstoff. Der Schwefelwasserstoffgehalt ist eine Eigenart der in einer bestimmten geologischen Situation zu Tage tretenden oder erbohrten Wässer. Diese geologische Situation legt in Verbindung mit der Thermik des Mineralwassers Lostorf 4 die Annahme nahe, daß die Wässer aus dem Untergrund des Molassebeckens aufsteigen. Bei Baden erklärt das direkte Auftauchen des Aquifers aus dem Untergrund des Molassebeckens die höchste Temperatur. Ein aus dem Untergrund des Molassebeckens gegen Bad Schinznach, Bad Lostorf, den Hauenstein-Basistunnel und den Belchentunnel aufsteigendes Wasser muß dagegen zuerst

unter der südlichsten Jurakette (Chestenberg oder Born-Engelberg) und unter der nördlich davon verlaufenden Synklinale (Aaretal-Synklinale im Falle von Bad Lostorf) auf mehreren Kilometern in einer vergleichsweise geringeren Tiefe durchfließen und kann sich dabei abkühlen.

Im Untergrund des Molassebeckens ist der Obere Muschelkalk, welcher den Aquifer der in Frage stehenden Mineralwässer bildet, aus Erdölbohrungen bekannt und besteht wie im Jura aus Dolomiten und Kalken. Der Trigonodusdolomit fand sich stets mehr oder weniger kavernös ausgebildet (BÜCHI et al. 1965). In der Bohrung Altishofen, 22 km südlich Bad Lostorf, zeigte ein bei 2090–2093 m im Trigonodusdolomit gezogener Bohrkern klüftigen, von Haarrissen durchsetzten Dolomit (KOPP 1955). Obwohl in den Erdölbohrungen «Porosität und Durchlässigkeit nach Augenschein und Testen höchstens mäßig, meistens schlecht» waren (BÜCHI et al. 1965), kann der Obere Muschelkalk im Untergrund des Molassebeckens einen mit dem des Dottenberg-Südschenkels vergleichbaren und mit diesem zusammenhängenden Aquifer bilden. Widersprüchlich scheint zunächst nur zu sein, daß weder von der Bohrung Pfaffnau 1 auf 500 m ü. M. noch von der Bohrung Altishofen auf 480 m ü. M. artesisch am Bohrlochkopf austretendes Wasser erwähnt wird, obwohl die Druckhöhe des in der gleichen Schichtgruppe vorhandenen Wassers bei Bad Lostorf auf etwa 550 m ü. M. liegt. Doch kann ein artesischer Aufstieg durch die schwere Bohrspülung verhindert worden sein, wie dies beim unteren Aquifer von Bad Lostorf in Bohrung 3 bis 580,4 m Tiefe der Fall war. Oder ein unter dem Molassebecken durchziehendes Karstsystem, in welchem der bei Bad Lostorf beobachtete Druck herrscht, muß in Pfaffnau und Altishofen nicht unbedingt erbohrt worden sein.

8.24 Hypothetisches Einzugsgebiet am Nordrand des Aarmassivs

Die im Untergrund des Molassebeckens vorhandenen Trias-Schichten treten in veränderter Ausbildung (Fazies) am Nordrand des Aarmassivs wieder zu Tage. Altersmäßig dürfte dort der Rötidolomit größtenteils dem Hauptmuschelkalk entsprechen (TRÜMPY 1959). Rauhwacken, die aus primär anhydritführenden Dolomiten entstanden sind, folgen, vermutlich als Äquivalent des Mittleren Muschelkalks, unter dem oft 40–50 m mächtigen Rötidolomit oder gehen, bei Innertkirchen, seitlich in ihn über. In diese durchlässigen Schichten kann Oberflächenwasser eingespeist werden. Sie sind im Gegensatz zu ihren Äquivalenten im Jura auch nicht überall mit undurchlässigen Schichtenfolgen abgedeckt, sondern von meist wiederum durchlässigen Gesteinen überlagert, durch welche ebenfalls Wasser in sie eindringen kann. Für einen zwischen Alpen und Jura zusammenhängenden Aquifer kann somit der Sedimentmantel des Aarmassivs das Gebiet der Einspeisung bilden. Nach dem in Lostorf festgestellten Gehalt des Wassers am Isotop Sauerstoff 18 und nach der dortigen Druckhöhe kämen Einzugsgebiete mit einer mittleren Höhe von 600–750 m in Frage, wie solche über dem Sedi-

mentmantel des Aarmassivs z. B. in den Umgebungen von Meiringen und Schattdorf (Reußtal) vorkommen (vgl. Ziff. 7.14).

Eine Verbindung zwischen diesen Gebieten und Bad Lostorf setzt jedoch voraus, daß die als Aquifer in Betracht zu ziehenden autochthonen Schichten zwischen dem Rand des Aarmassivs und dem Molassebecken auch in den großen Tiefen unter den überschobenen Decken des Alpenrandes (vgl. Fig. 3) mit genügender Durchlässigkeit durchziehen. Von Erdölbohrungen am österreichischen und süddeutschen Alpenrandgebiet ist bekannt, daß die Diagenese in der autochthonen Schichtenfolge weniger weit fortgeschritten ist als in gleichaltrigen Gesteinen des auf sie überschobenen Deckenpakets; «damit blieb auch der ursprüngliche Porenraum im autochthonen Bereich besser erhalten als im überschobenen Deckenpaket». Die Interpretation der Bohrungen ergibt «unter dem überschobenen alpinen Deckenpacket und der Decke der subalpinen Molasse autochthone flach gelagerte Molasse, unterlagert von Alttertiär und Mesozoikum» (BÜCHI 1974). Diese neuesten Untersuchungsergebnisse bestätigen somit die Möglichkeit eines Zusammenhangs von Wässern zwischen einem am Nordrand des Aarmassivs gelegenen Einzugsgebiet und den Südschenkeln der südlichsten, mit der Trias bis zum Niveau der Erdoberfläche hochgepreßten Jurafalten.

Für die Thermen von Baden hat ALBERT HEIM ebenfalls eine Herkunft aus dem Sedimentmantel des Aarmassivs postuliert. «Der Muschelkalk der Thermen von Baden fällt südlich ab unter das Molasseland. ... In den Alpen tritt er wieder zutage ... Das Wasser, das auf dem Rötidolomit (= Muschelkalk) der autochthonen Alpen einsickert, findet nach dem Gesetz der kommunizierenden Röhren die nächsten tiefen Austrittspunkte bei Baden und bei Schinznach im Durchschnitt von Limmat und Aare durch die Lägernkette. Die Temperatur, die Ertragsausgleichung, die lange Verzögerung der Schwankungen nach den Jahrgängen, die chemische Beschaffenheit, alles findet auf diese Art seine volle Erklärung» (HEIM 1919).

8.25 Hypothese einer Herkunft aus dem Jura

F. MÜHLBERG, H. SCHARDT und A. HARTMANN, der sich anfänglich der HEIMSchen Hypothese angeschlossen hatte, nahmen im Gegensatz zu HEIM eine Herkunft des Badener Thermalwassers aus dem westlich von Baden liegenden Jura an (MÜNZEL 1947). Bei einer normalen geothermischen Tiefenstufe wäre es notwendig, daß das Wasser aus dem Jura in eine Tiefe von 1300–1500 m eindringt und wieder hochsteigt, um an der Austrittsstelle eine Temperatur von 47°C zu haben. Dazu müßte das Wasser aber südwärts unter das Molassebecken fließen und dann nordwärts wieder aufsteigen. A. HARTMANN begegnete der Schwierigkeit einer solchen Erklärung durch die weitere Hypothese eines das einsickernde Wasser erwärmenden «vulkanischen Lakkolithen».

Trotz der schon von HEIM erwähnten und der neu hinzugekommenen

Indizien, welche für eine alpine Herkunft der Schwefelwässer des Jurasüdfusses sprechen, ist auch eine mögliche Herkunft des Mineralwassers Lostorf 3 aus dem Jura zu erörtern. Der Obere Muschelkalk des Dottenberg-Südschenkels, in welchem das Mineralwasser bei 250–350 m Tiefe erschlossen ist, tritt etwa 0,7–2,3 km westlich der Bohrungen zu Tage (Fig. 1). Hier kann also Oberflächenwasser aus Höhen über 600 m ü. M. in den betreffenden Aquifer versickern. Nach der Thermik und der chemischen Beschaffenheit eines Teils der im Hauenstein-Basistunnel austretenden Wässer ist es wahrscheinlich, daß diese durch Versickerungen in jener über dem Tunnel verlaufenden Muschelkalk-Zone (Fig. 2) gespeist werden. Ein rascher Abfluß von Wasser aus diesem Gebiet zu den das Mineralwasser Lostorf 3 erschließenden Bohrungen ist jedoch schon wegen des durch die Tritium-Bestimmungen belegten hohen Alters des Mineralwassers ausgeschlossen. Das gegen Westen gerichtete Druckgefälle, welches durch die Höhe von rund 550 m ü. M. bei den Bohrungen von Bad Lostorf und durch das Niveau von rund 430 m ü. M. des in den Tunnel auslaufenden Wassers gegeben ist, spricht sodann überhaupt gegen einen Abfluß aus der Muschelkalk-Zone in östlicher Richtung nach den Bohrungen von Bad Lostorf. Östlich der Bohrungen tritt der Obere Muschelkalk jedoch nicht mehr zu Tage und ist von den Mergeln des Keupers bedeckt, so daß dort die Annahme einer Versickerung nicht gegeben ist.

Die Schwankungen der Druckhöhen des Wassers in den Bohrungen von Bad Lostorf, welche den meteorologischen Ereignissen möglicherweise mit einer Verzögerung von 1–3 Wochen folgen (Ziff. 5.2), beweisen ebenfalls keinen Zufluß aus nahen Juragebieten. Angesichts des hohen Alters des Mineralwassers können diese Schwankungen nur durch Druckwellen, aber nicht durch einen kurzfristigen effektiven Zufluß von Wasser entstehen. Sie können auftreten, wenn die Druckhöhe des westlich der Bohrungen gegen den Tunnel abfließenden Wassers durch die Versickerung von Oberflächenwasser zunimmt oder während Trockenperioden abnimmt, sie können aber auch auf Änderungen der Druckhöhe in einem alpinen Einzugsgebiet zurückzuführen sein.

Ein lokaler oder regionaler Wärmeherd, durch welchen das Mineralwasser schon in einer Tiefe von 250–350 m auf 27° C erwärmt werden könnte, ist, wie erwähnt (Ziff. 8.21), auszuschließen. Wenn das Wasser von Versickerungen aus nahen Juragebieten stammen würde, müßte es also ähnlich wie mit derselben Hypothese die Thermen von Baden, wenn auch nicht auf die gleiche Distanz wie dort, zuerst südwärts unter die größere Bedeckung fließen und dann nordwärts wieder aufsteigen. Nur auf diese Weise könnte eine Herkunft aus dem Jura allenfalls erklärt werden. Dabei bliebe aber die Frage offen, wo das Einzugsgebiet läge, dessen Größe die festgestellte Ergiebigkeit ergeben würde und welches sich östlich des Bereichs der durch den Tunnel unter 550 m ü. M. bis auf 430 m ü. M. abgesenkten Druckhöhe befinden müßte.

In Abwägung der verschiedenen Fakten und der sich aus diesen ergebenen Indizien betrachten wir es als am wahrscheinlichsten, daß das Speisungsgebiet des Mineralwassers Lostorf 3 über dem Sedimentmantel des Aarmassivs liegt. Bei einer Distanz von 75 km und einer aufgrund des Tritiumgehalts zu vermutenden Fließzeit von 19–26 Jahren ergäbe sich eine Fließgeschwindigkeit von 8–11 m/Tag, was bei einem möglichen Druckgefälle von nur 1–2‰ eine durch Verkarstung entstandene gute Wasserwegsamkeit des Aquifers voraussetzen dürfte.

8.26 Mineralisationstyp

Im Mineralwasser Lostorf 3 sind wie im Mineralwasser 4 Calcium-, Magnesium-, Sulfat- und Hydrogenkarbonat die wichtigsten gelösten Bestandteile, aber mit Ausnahme des Hydrogenkarbonats in höheren Konzentrationen vorhanden. Das Mineralwasser 3 hat außerdem gegenüber dem Mineralwasser 4 und anderen normalen Muschelkalk-Grundwässern des Faltenjuras eine erhöhte Chlorid-Konzentration und enthält Schwefelwasserstoff. Für die Herkunft aus dem Oberen Muschelkalk ist der Fluorid-Gehalt bezeichnend, der mit 2,4 mg/l noch höher ist als im Mineralwasser 4.

8.27 Schwefelwasserstoff und Gesamtkohlensäuregehalt

Schwefelwasserstoff und gelöste Sulfide entstehen im sauerstofflosen Milieu durch die Reduktion²⁴ von Sulfaten. Bei Temperaturen unter etwa 700 bis 1000° C kann die Reduktion nur durch Mikroorganismen, die Desulfovibrionen, vollzogen werden, welche die lebensnotwendige Energie aus einer organischen Substanz beziehen. Die Entstehung von Schwefelwasserstoff (H_2S) oder von Sulfiden (HS^-) setzt somit das Vorhandensein von Sulfaten (SO_4^{2-}), von organischer Substanz und von sulfatreduzierenden Bakterien in einem anaeroben²⁵ Milieu voraus. Bei pH-Werten unter etwa 7 kommt als Produkt der Reduktion Schwefelwasserstoff vor. Ein Teil des Schwefelwasserstoffs kann an Metalle, vor allem an Eisen, gebunden und als Sulfid ausgefällt werden, wobei sich das Eisensulfid FeS wegen seiner Instabilität bei den in Frage kommenden pH-Werten in Pyrit (Schwefelkies) FeS_2 umwandelt.

Mit Methan (CH_4) als Beispiel einer organischen Substanz sind die wichtigsten Reaktionen in Tabelle 30, Seite 228, zusammengefaßt.

Die organischen Substanzen, welche zur Entstehung von Schwefelwasserstoff notwendig sind, stammen häufig aus Erdöl und Erdgas. Auch für die Mineralwässer Lostorf 3 und 2 sind natürliche Kohlenwasserstoffe als Ursache dafür zu betrachten, daß es zur Bildung von Schwefelwasserstoff

²⁴ Chemische Abspaltung von Sauerstoff aus einer Verbindung

²⁵ Ohne Sauerstoff

Tabelle 30
Entstehung von Schwefelwasserstoff und Schwefelkies

$\text{SO}_4^{2-} + \text{CH}_4$	$\rightarrow \text{HS}^- + \text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{O}$
$\text{HS}^- + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$	$\rightarrow \text{H}_2\text{S} + \text{HCO}_3^-$
<hr/>	
$\text{SO}_4^{2-} + \text{CH}_4 + \text{CO}_2$	$\rightarrow \text{H}_2\text{S} + 2\text{HCO}_3^-$
<hr/>	
$2\text{SO}_4^{2-} + 2\text{CH}_4$	$\rightarrow 2\text{HS}^- + 2\text{HCO}_3^- + 2\text{H}_2\text{O}$
$\text{Fe}^{2+} + 2\text{HS}^- + 2\text{HCO}_3^-$	$\rightarrow \text{FeS}_2 + 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
<hr/>	
$\text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 2\text{CH}_4$	$\rightarrow \text{FeS}_2 + 2\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$
<hr/>	

kommt. Im Oberen Muschelkalk, welcher den Aquifer des Mineralwassers Lostorf 3 bildet, sind von verschiedenen Orten Kohlenwasserstoffe bekannt. Im Trigonodusdolomit aller im Mittelland abgeteuften Erdölbohrungen sind Öl- und Gasspuren beobachtet worden (BÜCHI et al. 1965). Der Trigonodusdolomit und der Hauptmuschelkalk der Bohrung Altishofen hatten verschiedentlich Ölgeruch und Ölimprägnationen, der Trigonodusdolomit auf Klüften auch Öltröpfchen (KOPP 1955). In dem vom Belchentunnel durchfahrenen Hauptmuschelkalk und Trigonodusdolomit des aufgeschnittenen Südschenkels der Farisberg-Antiklinale fanden sich wie weiter südlich in den Oberen bunten Mergeln des Keupers die schwefelwasserstoffhaltigen Wässer in Verbindung mit Öl- und Gasindikationen (FRÖHLICHER und KEHRER 1968, SCHMASSMANN 1972). Im Gegensatz zu dem unter dem Molassebecken liegenden und am Südrand des Faltenjuras aufsteigenden Oberen Muschelkalk enthalten die nördlicheren Vorkommen des Oberen Muschelkalks im Faltenjura keine Kohlenwasserstoffe oder zumindest nicht in Mengen, die für die Entstehung von Schwefelwasserstoff ausreichen würden. Deshalb hat das Mineralwasser Lostorf 4, obwohl ein anaerobes Milieu gegeben wäre, keinen Schwefelwasserstoff.

Das jedenfalls im Vergleich zum Hauptmuschelkalk häufigere Vorkommen von Erdöl- und Gasspuren im Trigonodusdolomit kann erklären, weshalb die aus den nur den Trigonodusdolomit erschließenden Bohrungen 2 und 4 entnommenen Mineralwässer 3a und 3c einen höheren Schwefelwasserstoffgehalt haben als das Mineralwasser 3b aus der den Trigonodusdolomit und Hauptmuschelkalk erschließenden Bohrung 3.

Zusammen mit dem Schwefelwasserstoff entsteht auch Kohlensäure oder Hydrogenkarbonat, und zwar, wenn Methan der organische Stoff ist, auf ein Mol Schwefelwasserstoff ein Mol Kohlensäure (Tab. 30). Im Falle anderer organischer Verbindungen kommen andere Relationen vor, z.B. bei totaler Oxidation von Natriumlaktat auf 3 Mole Schwefelwasserstoff 2 Mole Kohlensäure (MÜNZEL 1947). Frei gesetzte Kohlensäure kann als solche oder als Hydrogenkarbonat auch dann in Lösung bleiben, wenn der

mit ihr entstandene Schwefelwasserstoff wegen der Fällung als Eisensulfid nicht mehr im Wasser ist.

Der Gesamtkohlensäure-Gehalt nimmt denn auch in den Mineralwässern von Bad Lostorf und in dem seiner Herkunft nach vergleichbaren Wasser von Bad Schinznach mit dem Schwefelwasserstoff-Gehalt zu:

Tabelle 31
Schwefelwasserstoff- und Gesamtkohlensäuregehalt der Mineralwässer

mmol/l	Mineral-	Mineral-	Mineral-	Mineral-
	wasser Lostorf 4	wasser Lostorf 3a	wasser Bad Schinznach	wasser Lostorf 2
	26./27.6.1972	19.6.1972	1913	17.6.1972
Schwefelwasserstoff H_2S	0,00	1,09	1,45	2,42
Hydrogenkarbonat HCO_3^-	4,43	4,30	4,77	9,26
Kohlensäure frei, Analysen-Wert CO_2 ..	0,85	1,60	1,87	2,51
Kohlensäure frei, zugehörig CO_2	1,15	2,67	3,02	2,24
Total $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_2$ (Analyse)	5,28	5,90	6,64	11,77
Total $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_2$ (zugehörig)	5,58	6,97	7,79	11,50
Gesamtkohlensäure-Überschuss gegenüber Lostorf 4 pro mmol $\text{H}_2\text{S}/\text{l}$				
Total $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_2$ (Analyse)	-	0,57	0,94	2,68
Total $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_2$ (zugehörig)	-	1,28	1,52	2,45

Da ein Teil des im Aquifer entstandenen Schwefelwasserstoffs als Eisen-sulfid ausgefällt sein kann, ist möglich, daß das Verhältnis zwischen dem Gesamtkohlensäuregehalt und dem insgesamt gebildeten Schwefelwasser-stoff kleiner als die angegebenen Werte ist. Der Vergleich zeigt jedoch, daß, wie theoretisch zu erwarten, der Gesamtkohlensäuregehalt größtenteils-mäßig um 1 mmol/l zunimmt, wenn 1 mmol $\text{H}_2\text{S}/\text{l}$ gebildet wurde.

8.28 Magnesium-Gehalt und Modelle der Lösungsvorgänge

In analoger Weise wie für das Mineralwasser 4 (Ziff. 8.15) sei auch für das Mineralwasser 3a an zwei Modellen dargelegt, wie man sich die Herkunft der gelösten Mineralbestandteile vorstellen kann. In Wirklichkeit werden die Vorgänge auch hier nicht streng in der Reihenfolge eines der beiden Modelle, sondern als sukzessive gleichzeitige Lösungs- und Mischungsvor-gänge ablaufen. Die Modelle zeigen jedoch, daß die hohen Magnesium-Gehalte des Wassers Lostorf 3 ohne eine Lösung von Magnesiumsulfat (Bittersalz) nicht zu erklären sind. Wegen des Kalk-Kohlensäure-Gleich-

Tabelle 32
Mineralwasser Lostorf 3a
Modelle über Herkunft der Hauptbestandteile

mval/l	Magne-	Calcium	Hydro-	Sulfat	Kohlen-	Gesamt-
	sium		gen-		säure	kohlen-
	Mg ²⁺	Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁺	frei, zuge- hörig	säure ⁵
					CO ₂	mmol/l
<i>Modell 1</i>						
Lösung von Kohlensäure ...	-	-	-	-	+ 9,64	+ 4,82 ⁶
Lösung von Dolomit (Mg + Ca = 1 : 1)	+ 3,50	+ 3,50	+ 7,00	-	- 7,00	+ 3,50 ⁷
Gleichgewichtswasser nach						
Lösung von Dolomit	3,0	3,50	7,00	-	2,64	8,32
Lösung von Gips	-	+ 26,38	-	+ 26,38	-	-
Gleichgewichtsherstellung ¹ .	-	- 4,88	- 4,88	-	+ 4,88	- 2,44 ⁸
Lösung von Bittersalz	+ 7,17	-	-	+ 7,17	-	-
Bildung von H ₂ S ²	-	-	+ 2,18	- 2,18	- 2,18	+ 1,09 ⁹
Mineralwasser Lostorf 3a ³ ..	10,67	25,00	4,30	31,37	5,34	6,97
<i>Modell 2</i>						
Lösung von Kohlensäure ...	-	-	-	-	+ 9,64	+ 4,82 ⁶
Lösung von Gips	-	+ 25,00	-	+ 25,00	-	-
Lösung von Bittersalz	+ 8,55	-	-	+ 8,55	-	-
Lösung von Dolomit ⁴	+ 2,12	± 0,00	+ 2,12	-	- 2,12	+ 1,06 ⁷
Bildung von H ₂ S ²	-	-	+ 2,18	- 2,18	- 2,18	+ 1,09 ⁹
Mineralwasser Lostorf 3a ³ ..	10,67	25,00	4,30	31,37	5,24	6,97
<i>Ionen-Verhältnisse</i>						
	Mg : Ca			(SO ₄ - Mg) : Mg		
	Modell 1	Modell 2		Modell 1	Modell 2	
Karbonat-Lösung	1,00	∞		-	-	
Sulfat-Lösung	0,27	0,34		3,68	2,92	
Gleichgewichtsherstellung ..	- 0,00	-		-	-	
Mineralwasser Lostorf 3a ...	0,43	0,43		1,94	1,94	

¹ Herstellung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts nach Lösung von Calcium-Ionen aus Gips.

² 1 mol CO₂/1 mol H₂S.

³ Zum Ausgleich der Kationen-Anionen-Bilanz - 0,03 mval Mg²⁺/l und + 0,03 mval SO₄²⁺/l.

⁴ Lösung von Dolomit und gleichzeitige Kalkfällung.

⁵ mval HCO₃⁻/l + $\frac{1}{2}$ mval CO₂/l.

⁶ Aus Luft (Bodenluft).

⁷ Aus Dolomitgestein (Karbonat).

⁸ Als Kalk.

⁹ Aus organischer Substanz.

gewichts, das nur bestimmte ausgewogene Konzentrationen an Hydrogenkarbonat- und Calcium-Ionen zuläßt, ist anzunehmen, daß namentlich in den Endphasen Magnesium-Sulfat aus den sie enthaltenden Gipslagern bevorzugt herausgelöst wird. Wegen des durch die Lösung von Calcium aus Gips beeinflußten Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts ist auch die Hydrogenkarbonat-Konzentration trotz des höheren Gesamtkohlensäuregehalts im Mineralwasser 3a nicht größer als im Mineralwasser 4. Zur Aufrechterhaltung des Gleichgewichts muß nämlich mehr als doppelt so viel freie Kohlensäure als im Mineralwasser 3 gelöst sein.

Zusammenfassend ergibt sich, daß kompliziert ineinander greifende Lösungs- und Mischungsvorgänge, Gleichgewichtssysteme und mikrobielle Stoffwechselprozesse schließlich die Beschaffenheit des Mineralwassers Lostorf 3 hervorrufen.

8.3 Mineralwasser Lostorf 2

Das Mineralwasser Lostorf 2 ist durch die Bohrung 1 in den Blagdeni-Schichten gefaßt. Da diese Schichten normalerweise undurchlässig bis schlecht durchlässig sind, müssen wir annehmen, daß das Wasser auf Klüften zutritt. Eine Zerkleinerung des Gesteins ist dadurch gegeben, daß es sich um ein abgeglittenes und dabei zerrüttetes Schichtpaket handelt.

Das Wasser entsteht durch Mischung verschiedener Wässer, deren Anteile je nach den hydraulischen Verhältnissen unterschiedlich sind. Der die hohen Natriumchlorid- und Schwefelwasserstoffgehalte bewirkende Anteil stammt zweifellos aus verhältnismäßig großer Tiefe. Dazu kommen ein Wasser, das zeitweilen einen erhöhten Calciumsulfat-Gehalt hervorruft, und ein Wasser, dessen verhältnismäßig geringe Mineralisation der eines normalen Felsgrundwassers aus Kalkschichten des Juras entspricht. Der Tritium-Gehalt, welcher etwa in der Mitte desjenigen eines jungen und eines mindestens 18 Jahre alten Wassers liegt, bestätigt die Mischung verschiedener Wässer (Ziff. 7.13).

Vom mineralarmen Anteil des Wassers ist anzunehmen, daß er nur die Gleitmasse und ihre Deckschichten durchflossen hat und aus der näheren und weiteren Umgebung stammt. Die zeitweise sich beimischenden calcium-sulfatreichen Wässer können aus dem Gipskeuper aufsteigen, welcher bei der Fassung oder wenig nördlich davon unter dem mit der Bohrung erschlossenen Aquifer vorkommt und aus dessen Vorkommen auch das Mineralwasser Lostorf 1 (alte Gipsquelle) mineralisiert wird.

Der aus der Tiefe stammende Anteil unterscheidet sich durch seinen hohen Natrium-Chlorid-Gehalt bei verhältnismäßig niedrigen Calcium-, Magnesium- und Sulfatgehalten deutlich von den Mineralwässern Lostorf 3 und 4. Bei den Pumpversuchen war auch kein hydraulischer Zusammenhang mit einem dieser beiden nur rund 400 m entfernt erbohrten Wässer zu erkennen.

Doch muß angenommen werden, daß der Tiefenwasser-Anteil des Wassers Lostorf 2 wie das Wasser Lostorf 3 in dem von Süden auftauchenden Oberen Muschelkalk des Dottenberg-Südschenkels, aber in diesem auf einem anderen Karst- oder Kluftsystem zufließt. Mehrere Indizien weisen darauf hin, daß der Aufstieg aus dem Aquifer des Oberen Muschelkalks und der Übertritt in die durch die Bohrung erschlossene Gleitmasse an einer quer zu den Jurafalten verlaufenden Störung stattfindet (vgl. Ziff. 2.8). Der Gehalt an Calcium-, Magnesium- und Sulfat-Ionen kann ursprünglich ein ähnlicher wie im Wasser Lostorf 3 sein, aber durch die Beimischung anderer, nicht nur oberflächennaher Grundwässer herabgesetzt werden.

Währenddem das Mineralwasser Lostorf 3 außer Kalken und Dolomiten seines Aquifers im wesentlichen nur Sulfate aus liegenden und hangenden Schichten zu lösen vermag und lediglich verhältnismäßig kleine Mengen an Natriumchlorid enthält, hat das Wasser Lostorf 2 irgendwo auf seinem Wege zwischen Einzugsgebiet und Quelle eine gute Verbindung zu einem unter dem Aquifer und den Dolomit- und Sulfatzonen im tieferen Mittleren Muschelkalk noch erhaltenen Steinsalzlager (vgl. Ziff. 3.21).

Genetisch mit der Lösung von Natriumchlorid hängt der erhöhte Bor-gehalt zusammen.

Der hohe Schwefelwasserstoffgehalt ist wie im Mineralwasser Lostorf 3 als eine mikrobielle Reduktion von Sulfaten zu erklären, die bei Anwesenheit von organischen Substanzen, im konkreten Fall von natürlichen Kohlenwasserstoffen (Erdöl und -gas), stattfinden kann. Die gleichzeitig mit der Bildung der großen Mengen von Schwefelwasserstoff aus der organischen Substanz frei gesetzte Kohlensäure kann vermehrt Kalk lösen, so daß das Wasser Lostorf 2 im unverdünnten Zustand einen Hydrogenkarbonat-Gehalt hat, der außerhalb von Gebieten eigentlicher Kohlensäurewässer eher ungewöhnlich ist.

9. Balneologischer Charakter der Wässer

9.1 Chemischer und thermischer Charakter

Nach der international üblichen Nomenklatur sind die Mineralwässer Lostorf 2–4 wie folgt zu bezeichnen:

Tabelle 33
Chemischer und thermischer Charakter der Mineralwässer von Bad Lostorf

Wasser	Name	Kurzbezeichnung*
Lostorf 2	Schwefelhaltiges Natrium – Chlorid – Wasser	$\text{Na} - \text{Cl}, \text{H}_2\text{S}$
Lostorf 3	Schwefelhaltiges Calcium – Magnesium – Sulfat – Hydrogenkarbonat – Thermalwasser	Therme (27°) $\text{Ca} - \text{Mg} - \text{SO}_4 - (\text{HCO}_3),$ H_2S
Lostorf 4	Thermalwasser mit akratischer Konzentration** (Akratherme)	Therme (27°)

* Kationen und Anionen mit mehr als 10 mval-% der gesamten Kationen- oder Anionenkonzentration, Werte > 50 mval-% fett, Werte < 20 mval-% in Klammern.

** Als akratische Konzentration wird eine solche bezeichnet, die weniger als 1 g/l beträgt.

9.2 Bezeichnung nach der schweizerischen Lebensmittelverordnung

Die Verordnung über den Verkehr mit Lebensmitteln und Gebrauchsgegenständen (Lebensmittelverordnung) vom 26. Mai 1936 (mit Änderungen und Ergänzungen bis 30. August 1972) bezieht sich unter anderem auf «Lebensmittel, die in den Verkehr gebracht werden» (Art. 1, Ziff. 1), so auf «Nahrungsmittel im allgemeinen, d.h. feste und flüssige, unverarbeitete oder verarbeitete Stoffe und Erzeugnisse tierischer, pflanzlicher oder mineralischer Herkunft, die sich durch den Gehalt an für den Aufbau oder Unterhalt des menschlichen Körpers notwendigen Stoffen auszeichnen» (Art. 2, Ziff. 1). Die Verordnung ist somit maßgebend, wenn ein Mineralwasser zu Trinkkuren verwendet oder sonstwie getrunken wird.

Nach der Verordnung (Art. 264) müssen die Mineralwässer Lostorf 2–4 wie folgt bezeichnet werden:

Tabelle 34

Bezeichnung der Mineralwässer von Bad Lostorf nach der schweizerischen Lebensmittelverordnung

Wasser	Bezeichnung
Lostorf 2:	Kochsalzwasser (muriatisches Wasser), Schwefelwasser und borhaltiges Wasser.
Lostorf 3:	Erdiges Wasser (Gipswasser), Fluorwasser, Schwefelwasser und Therme.
Lostorf 4:	Fluorwasser und Therme.

Wenn es durch geeigneten Betrieb oder durch eine tiefere Fassung gelingt, die Temperatur des gewonnenen Wassers auf über 14° C zu halten, könnte das Mineralwasser 2 auch als Subtherme bezeichnet werden.

Tabelle 35
Lostorfer Mineralwässer und Anforderungen der schweizerischen Lebensmittelverordnung

Bedingungen erfüllt

Litera nach Art. 264	Bezeichnung	Bedingungen	Festgestellte Werte (Fassungskopf)			
			Wasser Lostorf 2 Eingehende Analyse / Optimum	Wasser Lostorf 3 a (Lostorf 3 c)	Wasser Lostorf 3 b	Wasser Lostorf 4
a	Erdiges Wasser – Gipswasser	Summe der gelösten mineralischen Bestandteile $\geq 1 \text{ g/l}$ Calcium- und Magnesium-Ionen vorwiegend – Sulfat-Ionen vorwiegend	2,169/3,66 g/l 28,4/20,9% $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 11,3/10,1% SO_4^{2-}	2,509 g/l 96,2% $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 84,4% SO_4^{2-}	2,375 g/l 95,3% $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 82,6% SO_4^{2-}	0,906 g/l 96,6% $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 62,0% SO_4^{2-}
e	Kochsalz- wasser (muriatisches Wasser)	Summe der gelösten mineralischen Bestandteile $\geq 1 \text{ g/l}$ Natrium-Ionen vorwiegend Chlor-Ionen vorwiegend	2,169/3,66 g/l 70,3/78,0% Na^+ 70,5/78,8% Cl^-	2,509 g/l 3,0% Na^+ 3,7% Cl^-	2,375 g/l 3,7% Na^+ 3,6% Cl^-	0,906 g/l 2,4% Na^+ 2,6% Cl^-
h	Fluorwasser	Fluor-Ionen $\geq 1 \text{ mg/l}$	0,36 mg F^-/l	2,4 mg F^-/l	2,4 mg F^-/l	1,5 mg F^-/l
n	Schwefel- wasser	Hydrosulfid-Ionen, Thiosulfat-Ionen oder freier Schwefelwasserstoff....	50/100 mg $\text{H}_2\text{S}/\text{l}$	37 mg $\text{H}_2\text{S}/\text{l}$	16 mg $\text{H}_2\text{S}/\text{l}$	0
o	Borhaltiges Wasser	Bor $\geq 4 \text{ mg HBO}_2/\text{l}$	5,6 mg HBO_2/l	0,49 mg HBO_2/l	0,76 mg HBO_2/l	0,34 mg HBO_2/l
s	Subtherme	Temperatur dauernd zwischen 14 und 20°C	13,6/15,2° C	(27,2°)	(27,4°)	(27,3°)
t	Therme	Temperatur dauernd $> 20^\circ \text{C}$	13,6/15,2° C	27,2°	27,4°	27,3°

Tabelle 36
*Zusammenstellung der Mineralwasseranalysen von Prof. Dr. O. HÖGL
 und Dr. H. SENFTEN*
Werte in mg/l und physikalische Daten

mg/l	Mineral- wasser Lostorf 2 (Bohrung 1) 26.6.1972	Mineral- wasser Lostorf 3a (Bohrung 2) 19.6.1972	Mineral- wasser Lostorf 3b (Bohrung 3) 4.4.1972	Mineral- wasser Lostorf 4 (Bohrung 3) 26.6.1972
<i>Kationen</i>				
Ammonium NH ₄ ⁺	1,15	0,050	0,035	0,014
Lithium Li ⁺	0,2	0,050	0,90	< 0,1
Natrium Na ⁺	550	25	30	6,9
Kalium K ⁺	12,9	4,7	4,4	2,4
Magnesium Mg ²⁺	29	130	126	46,5
Calcium Ca ²⁺	144	501	462	170,0
Strontium Sr ²⁺	2,4	5,2	4,5	1,5
Mangan Mn ²⁺	< 0,02	< 0,02	0,015	0,1
Eisen Fe ²⁺	0,55	1,7	0,50	0,81
Kupfer Cu ²⁺	0,013	0,003	0,0013	0,0008
Zink Zn ²⁺	0,0005	< 0,0005	< 0,0005	0,063
Blei Pb ²⁺	< 0,001	< 0,001	< 0,002	< 0,002
Aluminium Al ³⁺	0,060	0,009	< 0,02	0,017
Summe Kationen	740,29	667,73	628,37	228,4
<i>Anionen</i>				
Fluorid F ⁻	0,36	2,4	2,4	1,5
Chlorid Cl ⁻	850	48	44,3	11,7
Bromid Br ⁻	0,15	0,027	0,23	0,07
Jodid J ⁻	0,08	0,036	0,22	0,025
Nitrat NO ₃ ⁻	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
Hydrogenkarbonat HCO ₃ ⁻	375	262	287	270
Sulfat SO ₄ ²⁻	183	1507	1390	380
Hydrogenphosphat HPO ₄ ²⁻	0,13	0,075	< 0,10	0,045
Hydrogenarsenat HAsO ₄ ²⁻	0,0078	0,00030	0,0013	0,0024
Molybdän Mo	< 0,0005	0,00014	0,00043	0,0016
Vanadium V	-	0,00052	0,00046	0,00060
Summe Anionen	1408,82	1819,63	1724,35	663,44
<i>Undissozierte Bestandteile</i>				
Metakieselsäure H ₂ SiO ₃	11,7	21	22	14
Orthoborsäure H ₃ BO ₃	8,0	0,69	0,76	0,48
Summe undissozierte Bestandteile ..	19,7	21,69	22,76	14,48
Summe der gelösten festen Bestandteile ..	2169	2509	2375	906
Schwefelwasserstoff H ₂ S	50	37	16	0
<i>Physikalische Daten</i>				
Wassertemperatur °C	13,6	27,0	27,4	27,4
Dichte (20/20°)	1,00183	1,002561	1,002470	1,000756
Leitfähigkeit µS/cm (20°)	2700	2520	2050	1100
pH	6,8	6,9	6,6	7,0

Tabelle 37
*Zusammenstellung der Mineralwasseranalysen von Prof. Dr. O. HÖGL
 und Dr. H. SENFTEN*
Werte in mval/l und mval-%

	Mineral- wasser Lostorf 2 (Bohrung 1) <i>mval/l</i>	Mineral- wasser Lostorf 3a (Bohrung 2) <i>mval/l</i>	Mineral- wasser Lostorf 3b (Bohrung 3) <i>mval/l</i>	Mineral- wasser Lostorf 4 (Bohrung 3) <i>mval/l</i>
	26.6.1972	19.6.1972	4.4.1972	26.6.1972
<i>Kationen</i>				
Ammonium NH ₄ ⁺	0,07	-	-	-
Lithium Li ⁺	-	0,01	0,13	-
Natrium Na ⁺	23,92	1,09	1,30	0,30
Kalium K ⁺	0,33	0,12	0,11	0,06
Magnesium Mg ²⁺	2,39	10,70	10,36	3,83
Calcium Ca ²⁺	7,20	25,00	23,05	8,48
Strontium Sr ²⁺	0,05	0,12	0,10	0,04
Eisen Fe ²⁺	0,02	0,06	0,02	0,03
Total Kationen	33,98	37,10	35,07	12,74
<i>Anionen</i>				
Fluorid F ⁻	0,02	0,13	0,13	0,07
Chlorid Cl ⁻	23,97	1,35	1,25	0,33
Hydrogenkarbonat HCO ₃ ⁻	6,15	4,30	4,71	4,43
Sulfat SO ₄ ²⁻	3,81	31,34	28,91	7,90
Total Anionen	33,95	37,12	35,00	12,73
<i>mval-%</i>				
<i>Kationen</i>				
Ammonium NH ₄ ⁺	0,2	-	-	-
Lithium Li ⁺	-	-	0,4	-
Natrium Na ⁺	70,3	3,0	3,7	2,4
Kalium K ⁺	1,0	0,3	0,3	0,5
Magnesium Mg ²⁺	7,0	28,8	29,5	30,1
Calcium Ca ²⁺	21,4	67,4	65,8	66,8
Strontium Sr ²⁺	-	0,3	0,3	0,2
Eisen Fe ²⁺	0,1	0,2	-	-
Total Kationen	100,0	100,0	100,0	100,0
<i>Anionen</i>				
Fluorid F ⁻	-	0,3	0,4	0,5
Chlorid Cl ⁻	70,5	3,7	3,6	2,6
Hydrogenkarbonat HCO ₃ ⁻	18,2	11,6	13,4	34,9
Sulfat SO ₄ ²⁻	11,3	84,4	82,6	62,0
Total Anionen	100,0	100,0	100,0	100,0

9.3 Balneologische Verwendungsmöglichkeiten und verfügbare Mengen

Folgende balneologische Bedeutung haben die Mineralwässer von Bad Lostorf schon heute oder könnte ihnen künftig zukommen:

Tabelle 38
*Balneologische Verwendungsmöglichkeiten und Ergiebigkeit der Wässer
 von Bad Lostorf*

Wasser	Verwendungsmöglichkeiten	Nutzbare Wassermenge Tagesmittel l/min
Lostorf 2	Heilwasser für Bäder mit einem von den andern Wässern verschiedenen Charakter	< 10
Lostorf 3	Heilwasser für Bäder	170
Lostorf 4	Badewasser, vor allem Schwimmbadwasser, und Mineral-Tafelwasser	>400* >700**

* Mit artesischem Auslauf.

** Mit Pumpen.

10. Anhang

10.1 Erläuterung der Analysen-Einheiten

Ionen	Im Wasser: In Lösung befindliche Elemente oder Elementkombinationen, die eine oder mehrere positive oder negative elektrische Ladungen tragen, Kationen mit positiver Ladung (z. B. Na^+ , Ca^{2+}), Anionen mit negativer Ladung (z. B. Cl^- , SO_4^{2-}).																
mg/l	Konzentrationen eines Stoffs (Ion, Gas usw.), angegeben als Milligramme ($1/1000 \text{ g}$) in 1 Liter Wasser.																
mmol/l	Konzentration eines Stoffs (Ion, Gas usw.), angegeben als Millimol ($1/1000 \text{ Mol}$) in 1 Liter Wasser. 1 mmol = 1 mg dividiert durch das Molekulargewicht, z. B.: Stickstoff N_2 : 1 mmol/l = 28 mg/l Kohlensäure CO_2 : 1 mmol/l = 2 mval/l = 44 mg/l. Schwefelwasserstoff H_2S : 1 mmol/l = 34,08 mg/l. Hydrogenkarbonat HCO_3^- : 1 mmol/l = 1 mval/l = 61,019 mg/l.																
mval/l	Konzentration eines Ions, angegeben als Milligrammäquivalente ($1/1000 \text{ Grammäquivalente}$) in 1 Liter Wasser. 1 mval = 1 mg dividiert durch das Äquivalentgewicht. Äquivalentgewicht = Molekulargewicht : Wertigkeit, z. B.: <table><tbody><tr><td>Kalium K^+</td><td>1 mval/l = 39,1 mg/l</td></tr><tr><td>Natrium Na^+</td><td>1 mval/l = 22,99 mg/l</td></tr><tr><td>Calcium Ca^{2+}</td><td>1 mval/l = 20,04 mg/l</td></tr><tr><td>Magnesium Mg^{2+}</td><td>1 mval/l = 12,16 mg/l</td></tr><tr><td>Chlorid Cl^-</td><td>1 mval/l = 35,457 mg/l</td></tr><tr><td>Nitrat NO_3^-</td><td>1 mval/l = 62,012 mg/l</td></tr><tr><td>Hydrogenkarbonat HCO_3^-</td><td>1 mval/l = 61,019 mg/l</td></tr><tr><td>Sulfat SO_4^{2-}</td><td>1 mval/l = 48,032 mg/l</td></tr></tbody></table> 1 mval/l = 5 französische Härtegrade	Kalium K^+	1 mval/l = 39,1 mg/l	Natrium Na^+	1 mval/l = 22,99 mg/l	Calcium Ca^{2+}	1 mval/l = 20,04 mg/l	Magnesium Mg^{2+}	1 mval/l = 12,16 mg/l	Chlorid Cl^-	1 mval/l = 35,457 mg/l	Nitrat NO_3^-	1 mval/l = 62,012 mg/l	Hydrogenkarbonat HCO_3^-	1 mval/l = 61,019 mg/l	Sulfat SO_4^{2-}	1 mval/l = 48,032 mg/l
Kalium K^+	1 mval/l = 39,1 mg/l																
Natrium Na^+	1 mval/l = 22,99 mg/l																
Calcium Ca^{2+}	1 mval/l = 20,04 mg/l																
Magnesium Mg^{2+}	1 mval/l = 12,16 mg/l																
Chlorid Cl^-	1 mval/l = 35,457 mg/l																
Nitrat NO_3^-	1 mval/l = 62,012 mg/l																
Hydrogenkarbonat HCO_3^-	1 mval/l = 61,019 mg/l																
Sulfat SO_4^{2-}	1 mval/l = 48,032 mg/l																

10.2 Literatur

- BARTHOLET, H.U. (1964): *Geologie des Tafel- und Faltenjuras zwischen Eptingen und Oltingen*. Tätber. Natf. Ges. Basell. 23, 43–130.
- BÜCHI, U.P., LEMCKE, K., WIENER, G., und ZIMDARS, J. (1965): *Geologische Ergebnisse der Erdölexploration auf das Mesozoikum im Untergrund des schweizerischen Molassebeckens*. Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing. 32/82, 7–38.
- BÜCHI, ULRICH P. (1974): *Die Schweizerische Erdölfrage 1973*. Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing. 41/99, 5–16.
- BUXTORF, A. (1916): *Prognosen und Befunde beim Hauensteinbasis- und Grenchenbergtunnel und die Bedeutung der letzteren für die Geologie des Juragebirges*. Verh. Natf. Ges. Basel 27, 184–254.

- BUXTORF, A. (1917): *Geologisches Profil 1:10000*. In: WIESMANN, E.: *Der Bau des Hauenstein-Basistunnels*. Berlin.
- BUXTORF, A. (1951): *Geologische Generalkarte der Schweiz 1:200000, Erläuterungen zu Blatt 2 Basel-Bern*. Kümmerli & Frey, Bern.
- Eidgenössische Landestopographie (1964): *Landeskarte der Schweiz 1:25000, Blatt 1088 Hauenstein, Blatt 1089 Aarau*. Wabern-Bern.
- ENGELHARDT, WOLF Frh. v. (1973): *Die Bildung von Sedimenten und Sedimentgesteinen*. Schweizerbarth, Stuttgart.
- FISCHER, FERDINAND (1880): *Die chemische Technologie des Wassers*. Viehweg, Braunschweig (mit Analyse Lostorf).
- FISCHER, H. und LUTERBACHER, H. (1963): *Das Mesozoikum der Bohrungen Courtion 1 und Altishofen 1*. Beitr. Geol. Schweiz, NF 115.
- FRÖHLICHER, H. (1946): *Einige Beobachtungen an thermalen Quellen der beiden Hauensteintunnel*. Verh. schweiz. Natf. Ges.
- FRÖHLICHER, H. (1952): *Beobachtungen an thermalen Quellen der beiden Hauensteintunnel*. Leben und Umwelt 8.
- FRÖHLICHER, H. und KEHRER, L. (1968): *Öl- und Gasindikationen in der Trias des Belchen-tunnels*. Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing. 35/87.
- GOLDSCHMID, HEINRICH OTTO (1965): *Die Geologie des Faltenjura zwischen Olten und Unterm Hauenstein*. Tätber. Natf. Ges. Basell. 24, 15–91.
- GSELL, FRANZ JOSEF (1968): *Geologie des Falten- und Tafeljura zwischen Aare und Wittnau und Betrachtungen zur Tektonik des Ostjura zwischen dem Unteren Hauenstein im W und der Aare im E*. Zürich.
- HARTMANN, A. (1917): *Chemische und geologische Verhältnisse der Quellen von Lostorf und anderer Mineralquellen des östlichen Juras*. Mitt. aargau. Natf. Ges. 14, 52–79.
- HARTMANN, A. (1925): *Die Mineral- und Heilquellen des Kantons Aargau*. Separatdruck Mitt. aargau. Natf. Ges. 17.
- HEIM, ALBERT (1919): *Geologie der Schweiz, Band 1*. Tauchnitz, Leipzig.
- HEM, JOHN D. (1970): *Study and interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. Second Edition*. Geological Survey, Water-Supply Paper 1473, Washington.
- JÄCKLI, H., und KEMPF, TH. (1972): *Erläuterungen Hydrogeologische Karte der Schweiz 1:100000, Blatt Bözberg-Beromünster*. Zürich.
- KOPP, J. (1952): *Die Erdölbohrung Altishofen*. Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing. 19/57, 21–24.
- KOPP, J. (1955): *Erdölanzeichen in der Trias der Bohrung Altishofen*. Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing. 21/61, 1–6.
- KRUSEMAN, GIDEON P., und DE RIDDER, NICOLAAS A. (1973): *Untersuchung und Anwendung von Pumpversuchsdaten*. Müller, Köln-Braunsfeld.
- LAUBSCHER, HANS P. (1961): *Die Fernschubhypothese der Jurafaltung*. Eclogae geol. Helv. 54/1, 221–282.
- LAUBSCHER, HANS P. (1965): *Ein kinematisches Modell der Jurafaltung*. Eclogae geol. Helv. 58/1, 231–318.
- LEMCKE, K., BÜCHI, U.P., und WIENER, G. (1968): *Einige Ergebnisse der Erdölexploration auf die mittelländische Molasse der Zentralschweiz*. Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing. 35/87, 15–34.
- MATTHESS, GEORG (1973): *Die Beschaffenheit des Grundwassers. Lehrbuch der Hydrogeologie, Band 2*. – Bornträger, Berlin-Stuttgart.
- MERKI, PAUL (1961): *Der Obere Muschelkalk im östlichen Schweizer Jura*. Eclogae geol. Helv. 54/1, 137–219.

- MÜHLBERG, F. (1908): *Geologische Karte von Aarau 1:25000.*
- MÜHLBERG, F. (1914): *Geologische Karte des Hauensteingebietes 1:25000.*
- MÜHLBERG, MAX (1943): *Temperaturmessungen in der Bohrung Tuggen in der Linthebene und einige andere Befunde in der Schweiz.* Eclogae geol. Helv. 36/1, 17–34.
- MÜNZEL, ULRICH (1947): *Die Thermen von Baden.* Selbstverlag, Baden.
- NUSSBERGER, G., CADISCH, J., KELLER, A., NUSSBERGER, A., und WERDER, J. (1937): *Die Mineral- und Heilquellen der Schweiz.* Zimmermann, Bern.
- OESCHGER, H., und SIEGENTHALER, U. (1972): *Umgebungsisotope im Dienste der Hydrologie und Ausblick auf neue Methoden.* gwf Wasser-Abwasser 113, 501–508.
- Physikalisches Institut Universität Bern (1972): *Merkblatt zur Altersbestimmung von Grundwasser mit Tritium.*
- PRASAD, NARENDRA (1974): *Sedimentology of Keuper from the Belchen-Tunnel eastern Swiss Juras.* Diss. Basel; Liestal.
- RÜSCH, GABRIEL (1832): *Die sämtlichen Mineralquellen und Bäder der Schweiz.* Dalp, Bern und Chur.
- SCHMASSMANN, H. (1947): *Zur geochemischen Interpretation von Wasseranalysen.* Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 27, 527–534.
- SCHMASSMANN, HANSJÖRG (1949): *Die Sauerstoffsättigung natürlicher Wässer, ihre Ermittlung und ihre Bedeutung in der Hydrologie.* Schweiz. Z. Hydrol. 11, 430–462.
- SCHMASSMANN, HANSJÖRG (1956): *Die Ermittlung der Sauerstoff-Sättigungskonzentration.* Schweiz. Z. Hydrol. 18, 144–155.
- SCHMASSMANN, H. (1972): *Baselbieter und Solothurner Faltenjura, Mineral- und Thermalquellen.* In: JÄCKLI, H., und KEMPF, TH.: *Erläuterungen Hydrogeologische Karte der Schweiz, Blatt Bözberg-Beromünster.* Zürich.
- SCHÜEPP, M. (1960): *Klimatologie der Schweiz, C. Lufttemperatur. 1. Teil.* Beih. Ann. schweiz. Meteorol. Zentralanst. (1959).
- Schweizerische Alpenposten (1950): *Grimselpass Meiringen–Gletsch, Querprofil durch das zentrale Aarmassiv.* PTT, Bern.
- Schweizerischer Bundesrat (1936–1972): *Verordnung über den Verkehr mit Lebensmitteln und Gebrauchsgegenständen (Lebensmittelverordnung).* (Vom 26. Mai 1936.)
- Schweizerische Meteorologische Zentralanstalt (1969–1973): *Ergebnisse der täglichen Niederschlagsmessungen.*
- SIEGENTHALER, U., OESCHGER, H., und TONGIORGI, E. (1970): *Tritium and Oxygen-18 in natural water samples from Switzerland.* In: *Isotope Hydrology 1970.* International Atomic Energy Agency, Vienna.
- SPICHER, A. (1972): *Geotektonik.* In: *Atlas der Schweiz, Blatt 5.* Schweiz. Landestopographie, Wabern-Bern.
- TRÜMPY, RUDOLF (1959): *Hypothesen über die Ausbildung von Trias, Lias und Dogger im Untergrund des schweizerischen Molassebeckens.* Eclogae geol. Helv. 52/2, 435–448.
- VOGEL, H. U. v. (1974): *Chemiker-Kalender.* Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- WIEDERHOLD, W. (1961): *Die raumzeitlichen Verhältnisse des Senktrichters eines Brunnens im Grundwasser mit freier Oberfläche.* Z. f. GW-Verl., Frankfurt (M).
- WIEDERHOLD, W. (1965): *Theorie und Praxis des hydrologischen Pumpversuchs.* gwf Wasser-Abwasser 106, 933–938, 1170–1176.
- WIESMANN, E. (1917): *Der Bau des Hauenstein-Basistunnels.* Julius Berger Tiefbau-Aktiengesellschaft, Berlin.
- WURSTER, PAUL (1964): *Geologie des Schilfsandsteins.* Mitt. geol. Staatsinst. Hamburg 33.
- ZIMMERMANN, U., und ZÖTL, J. (1971): *Deuterium- und Sauerstoff-18-Gehalt von Casteiner Thermal- und Kaltwässern.* Steirische Beitr. Hydrogeol. 23, 127–132.