Dr. Ulrich Koch, Dr. Jens Heinicke
Sächsische Akademie der Wissenschaften zu Leipzig
Arbeitsstelle Bad Brambach, Freiberg

Prof. Dr. Detlef Hebert
TU Bergakademie Freiberg
Institut für Angewandte Physik

Dipl.-Hydr. Manuela Voßberg
UBV
Umweltbüro GmbH Vogtland

Auswirkungen der Fassungssanierung der Wettinquelle, Bad Brambach, auf die Altersstruktur des Mineralwassers

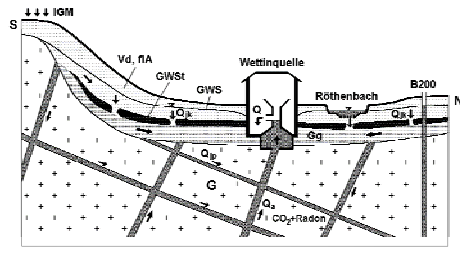
Kurzfassung

Während und nach der Rekonstruktion der Wettinquelle in Bad Brambach im Jahre 1999 wurden umfangreiche Untersuchungen zur Tritiumkonzentration und der spezifischen Leitfähigkeit des Quellwassers durchgeführt, die eine Zunahme der Sensitivität hydrochemischer Parameter der Mineralquelle gegenüber Druckschwankungen im Grundwasserleiter belegen.
Mischungsberechnungen auf Basis der spezifischen Leitfähigkeit zeigen, dass im speziellen Fall kurzfristig zufließende oberflächennahe Grundwässer mit Hilfe der Tritium-Altersverteilung allein nicht identifiziert werden können.
In diesem Zusammenhang konnten eine Mischwasserkomponente mit ca. 4 TU in geringerer Tiefe sowie an einer benachbarten Tiefbohrung ein tritiumfreies Mineralwasser in 135 m Tiefe nachgewiesen werden. Zumischungen jüngerer Anteile bei hydrologischen Extremereignissen beeinflussen vorwiegend die erstere Komponente.
Ungeachtet der Fassungssanierung sind die langfristig heraus gebildeten balneologischen-hygienischen Eigenschaften des Wassers der Wettinquelle praktisch unverändert geblieben. Dazu trägt nicht zuletzt der konsequente Grundwasserschutz vor Ort bei.

Die Wettinquelle

Hydrogeologische Grundlagen

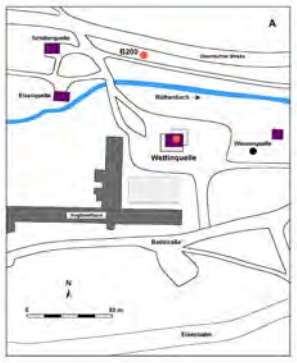
- Bad Brambacher Grundwassersystem = tektonisch stark inhomogener geklüfteter Fichtelgebirgs-Granit-Aquifer
  → im Bereich der Mineralquellen von bis zu 6m mächtigen Granitzersatz und fluviatilen Ablagerungen überdeckt
- Sedimentäre Bedeckung durchzogen von lehmig-tonigen Bänderungen und zahlreichen anmoorig-humosen Einlagerungen
  → gute, jedoch nicht durchgängige Abschirmung gegen Infiltrationswässer

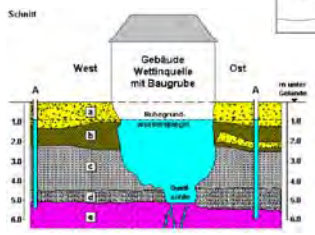


Profil durch das Aquifersystem (schematisch) :
G – Granit–Kluftgrundwasserleiter;
Gg – Granitgrus (Zersatzzone);
GWSt – Grundwasserstauer (tonig–humos, inhomogen);
IGM – Infiltrationsgebiet des zukünftigen Mineralwassers;
GWS – Grundwasserspiegel;
Vd,flA – Verwitterungsdecke, fluviale Ablagerungen;
Q – Quellschüttung;
Q_a – alte Tiefenwasserkomponente;
Q_p,Q_k – permanent bzw. kurzzeitig zusitzendes Jungwasser

- Wettinquelle als unter Flur gespanntes, frei auslaufendes Mineralwasser
- Röthenbach hat **bedeutenden Einfluss** auf den Grundwasserspiegel im Fassungsgebiet und somit auf die Quellschüttung während Hochwasser
  → Nutzung der Wasserstandsdaten für vergleichende Berechnungen (nicht Niederschlag; somit Erfassung von Schneeschmelzperioden)

Lageplan der flach gefassten Mineralquellen im Kurpark Bad Brambach mit dem Röthenbach u. der 200 m Bohrung (B200). Der für die Korrelation zwischen Wasserstand und Quellschüttung benutzte Pegel 3 befindet sich etwa 130 m westlich der Wettinquelle



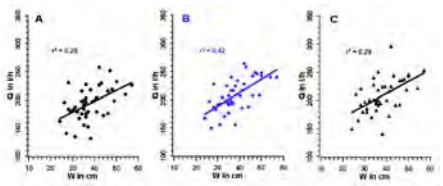


Schema der Wettinquelle mit Gebäude und zwei der vier während der Fassungsrekonstruktion betriebenen Absenkbrunnen (A)
a – Auffüllung, Grobsand;
b – Schluff mit starken organischen Beimengungen (tonig–humoser GW–Stauer);
c – Kies, Mittelsand;
d – Verwitterungszone des Granits;
e – geklüfteter Granit;
Der Röthenbach befindet sich 25 m nördlich des Quellgebäudes (Fließrichtung W–O)

Wasserstand und Quellschüttung

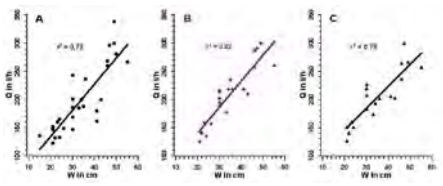
- Situation: Hochwasser im **Röthenbach**
  - Behinderung des hypodermischen Abflusses im Einzugsgebiet der Quellen
  - unterirdischer Rückstaueffekt
  - Druckwasserspiegelanstieg
  - Schüttungserhöhung in flachen Quellfassungen mit zeitlicher Verzögerung von 18 – 48 h

  = Röthenbach als **Hauptsteuerglied des Druckregimes**
- Reaktion der Wettinquelle nach 20–40h, deutliche Korrelation bei 24h-Zeitverschiebung



Wettinquelle Bad Brambach vor der Fassungsrekonstruktion 1999 : Abhängigkeit der Quellschüttung Q von den zugehörigen Wasserstandsmaxima W im Röthenbach (Pegel 3) bei verschiedenen Zeitverschiebungen von
A: 0 Tagen,
B: 1 Tag,
C: 2 Tagen
(Tageswerte aus der Zeitreihe 12/1985 – 05/1997)

- 2 Jahre nach Fassungssanierung:
  kaum veränderte Reaktionszeiten der Quelle auf HW-Ereignisse,
  Abhängigkeit von Schüttung auf Bachwasserstand ist **wesentlich stärker** geworden

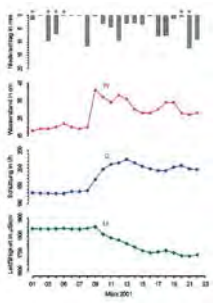


Wettinquelle Bad Brambach nach der Fassungsrekonstruktion 1999 : Abhängigkeit der Quellschüttung Q von den zugehörigen Wasserstandsmaxima W im Röthenbach (Pegel 3) bei verschiedenen Zeitverschiebungen von
A: 0 Tagen,
B: 1 Tag,
C: 2 Tagen
(Tageswerte aus der Zeitreihe 02/2000 – 05/2002)

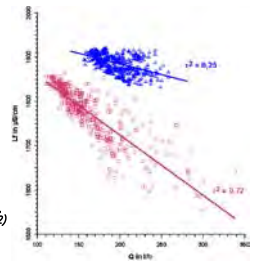
Quellschüttung und Leitfähigkeit

- Situation: zu Beginn von Hochwasserereignissen
  - kurzzeitige Erhöhung der Lf von 3-5% im Quellwasser

  andauernd hohe Wasserstände
  - Rückgang der Gesamtmineralisation unter Ausgangsniveau



*Beispiel für die Ganglinien des Wasserstandes (W) am Röthenbach Pegel 3, der Schüttung (Q) und der Leitfähigkeit (Lf) des Wassers der Wettinquelle während einer Schneeschmelzperiode im März 2001. Die mit * gekennzeichneten Säulen bezeichnen Schneeniederschläge, die nicht abflusswirksam werden.*

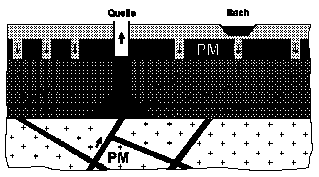


Abhängigkeit der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit Lf (bei 25° C) von der Quellschüttung (Q) an der Wettinquelle Bad Brambach:
vor der Fassungssanierung (Tageswerte 1996 – 1998),
nach der Fassungssanierung (Tageswerte 2000 – 2002)

- Vor Sanierung: Korrelation zwischen Quellschüttung - Leitfähigkeit gering
- Sanierung: Eingriff in vorhandenen Schichtenaufbau des Untergrundes, z.B. Auelehmschicht im Umfeld der Wettinquelle teilweise entfernt (Baugrube)
  → Einbau von Tonschichten mit etwa gleichen Durchlässigkeiten (Wiederherstellung der Schutzfunktion)
- nach Sanierung: mittlere Leitfähigkeit lediglich um 6% verringert
  Abhängigkeit von Quellschüttung **deutlich gestiegen**

Tritium-Modellierung

- Problem: stark zurück gegangene ^{3}H-Konzentration im Niederschlag
  - zunehmend eingeschränkte Einsatzmöglichkeit
  - **Alternativen notwendig für hydrogeologische Untersuchungen am geklüfteten Festgesteins-GWL**
- Modellansatz und –vorstellung des Bad Brambacher Aquifersystems:
  Exponential-Piston-Flow-Modell (EPM) kombiniert mit
  parallel geschalteten Piston-Flow-Modell (PM)



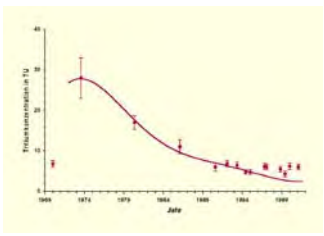
Konzeptionelles Fließmodell für das Mineralwasser der Wettinquelle : PM–Piston–Flow–Modell, EM–Exponentialmodell

PM "alte" (tritiumfreie) Komponente, aus den vertikal verlaufenden Klüften des Festgesteins–GWL, liefert Hauptbeitrag zur Gesamtmineralisation, "tritiumfreies Wasser" = Wasser, dass >50 Jahre den GWL durchfloss

EM zufließende Jungwasserkomponente aus Lockergestein bzw. Granitzersatzschicht Speisungsprozess im unbedeckten Nährgebiet

PM in Reihe zu EM, beschreibt Sickerzeit etwa im Auelehm

- Nutzung Programm MULTIS (RICHTER & SZYMCZAK 1992) mit Inputfunktion des Niederschlages von Freiberg/Sachsen



Nach dem Piston–Flow–Exponential–Modell angepasste ^{3}H–Altersverteilungsfunktion für die Tritiumwerte der Wettinquelle im Zeitraum 1973–2001

- Ergebnisse:
  Austauschzeitkonstante (mittlere Verweildauer) für
  Lockergesteinsaquifer (EM) – 15 Jahre
  Sickerzeit in Deckschichten (PM) – 7 Jahre
  → Anteil dieses Wassers an Schüttung – 20 %
  → Hauptanteil ist älteres, im Kluftaquifer fließendes Mineralwasser

ab ca. 1997 - Messwerte über Modellkurve, Trend auch nach Sanierung / Erreichen des normalen Schüttungsregimes (ab 2000) (Mittel 6,1 ± 0,8 TU)

Niedrigere Messwerte von Sommer 1999 passen besser in Kurve (aus Klüften bei maximaler Absenkung; Mittel 4,3 ± 0,7 TU)

- **unter ungestörten Bedingungen gab es stets eine Zumischung „älteren" Jungwassers aus kiesig-sandiger Zersatzzone**
- deren Anteil wurde während Absenkphase stark zu Gunsten der alten Mineralwasserkomponente reduziert

Konstanz der Tritium-Messwerte **seit 1997**
- **Tritium-Methode allein nicht aussagefähig, ob es ab 2000 einen zusätzlichen Effekt infolge der Fassungssanierung gegeben hat**

diese Tatsachen, die gestiegene Abhängigkeit zwischen W–Q bzw. Q–Lf und die Erfahrungen aus der Sanierung geben
- Anlass zur Einbeziehung von **einfachen linearen Mischungsberechnungen** in Modellbetrachtung
- Von großer Bedeutung für deren Interpretation ist **Existenz von tritiumfreien**, also vergleichsweise „alten" Wässern im UG

Ergebnisse

- Mischungsberechnung für ^{3}H und Lf für HQ-Zeiträume 2/2001 und 2/2002 mit Werten Tab. 2 und Gl. 1-5

Parameter/Zeitraum	Trockenwetter 06/1999 (Hauptkluft, Quellsohle)	Hochwasser 05./07.02.2001	Hochwasser 27./28.02.2002
Wettinquelle			
Q in l/h	Wasserhaltung	218	332
$C(^3H)$ in TU	--	6.0	6.0
$C(^3H)_k$ in TU	4.3	--	--
Lf in µS/cm	--	1807	1612
Lf_{fa} in µS/cm	1996	--	--
Röthenbach			
$C(^3H)_k$ in TU	--	11.4	11.4
Lf_k in µS/cm	--	120	115

Eingangsgrößen für Mischungsberechnungen an der Wettinquelle gemäß der Gleichungen (2)–(5). Bei den Tritiumwerten wurde zur Vereinfachung eine zeitliche Konstanz zwischen 2001 und 2002 angenommen

- Vorab: Aufstellung Lf-Mineralisations-Beziehung für Mineralquellen von Bad Brambach und experimentelle Bestimmung Verlauf Lf eines Quellwassers bei Verdünnung mit Bachwasser
  - beide Kurven mit linearem Verlauf
  - Nutzung Lf als Äquivalent der Mineralisation erlaubt
- Auffällig: Differenz in Mischungsanteilen zwischen ^{3}H- und Lf-Variante ist nur gering unter Beachtung ^{3}H-Analysenunsicherheit von 10%

	Anteil Mischwasser (Trockenwetter) α_m	Anteil kurzeitig zusitz. Jungwasser α_{jk}	Quellschüttung Q in l/h	Q_m in l/h (α_m·Q)	Q_{jk} in l/h (α_{jk}·Q)
Tritium					
2001	0.76	0.24	218	166	52
2002	0.76	0.24	332	252	80
Leitfähigkeit					
2001	0.90	0.10	218	196	22
2002	0.80	0.20	332	266	66

Ergebnisse der Mischungsberechnung für Tritium und Leitfähigkeit an der Wettinquelle Bad Brambach während zweier Hochwasserperioden im Februar 2001 und Februar 2002 unter Verwendung des Gleichungsssystems (1)–(5)

Berechnung nach Gl. 3 mit Werten für Lf_m und Lf_{jk} und Ergebnisse von α_m bzw. α_{jk} **theoretische Lf der Jungwasserkomponente** zum Zeitpunkt der Zumischung nach der Bodenpassage:

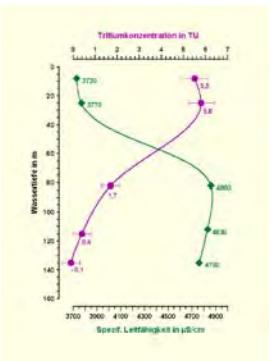
2001: 1.209 µS/cm
2002: 396 µS/cm ➡ entspricht gut zu Lf-Messung an oberflächennahen GW-Aufschl. im UG (mittel 300 – 420 µS/cm)

Vergleich Quellschüttungsanteile beider Hochwasserperioden
2002 Erhöhung Gesamtschüttung um 52% gegenüber 2001
- ↘ Schüttungsanteil Q_{jk} **verdreifacht**
- ↘ offenbar verhindert deutlich schnellere Aquiferpassage des jungen Wassers bei extremen HQ stärkere Aufmineralisierung

getroffene Annahme
Q_m = 60 – 85 % tritiumfrei + 15 – 40 % permanent zusitzendes Jungwasser
bedeutet für HQ-Fall (α_m = 0,76)
- ↘ Verringerung des Anteils „alten" Mineralwassers Q_a auf 45 – 65 % der Gesamtquellschüttung

Tritiumfreie Wässer

- Nachweis an **200m Bohrung** (30m nördlich WQ, 10m nördlich Röthenbach)
- Probenahme 4/1959:
  nach geringer Absenkung **15m-Eruption**, kleinere folgten
  Ursache: extreme CO_2-Übersättigung des Wassers in der Tiefe, mit Bohrung stark CO_2-führende Klüfte erschlossen
  mittlere Zuflussmenge 0,38 l/min (berechnet)
- Probenahme 5/2001:
  Aufnahme Tritium- und Leitfähigkeitsprofil (keine Absenkung)
  Nachweis tritiumfreies Wasser in 135m Tiefe



Tiefenprofile für Tritium und spezifische elektrische Leitfähigkeit (bei 25° C) an einer 200 m tiefen, quasi–stagnierenden Mineralwasserbohrung 30 m nördlich der Wettinquelle, Bad Brambach

LF 2,1 bis 2,7-fache der Wettinquelle,
Tritium im oberen Bereich ca. Wettinquelle,
Unterhalb 75m zeigen Tritium und Lf keinen Einfluss oberflächennaher Wässer an,
> 60 m Tiefe Lf nahezu konstant,
Tritium noch verweildauerbedingt geschichtet.

Eruption an der 200–m–Mineralwasserbohrung Bad Brambach nach der hydrogeologischen Beprobung vom 10. Mai 2001

Eruption ähnlich der von 1959
mittlere Zuflussmenge 0,66 l/min (berechnet)
(höher aufgrund Undichtigkeiten im oberen Bereich des Rohres)

Zeitmarke 1959 ☆ Beleg, dass das 2001 in 135m Tiefe angetroffene **Wasser bereits beim Zulauf vor 42 Jahren tritiumfrei** war

Rückrechnung Inputkonzentration von max. ^{3}H-Konzentration 0,3 TU in 135 m ergibt 3,2 TU für 1959
- ☆ ist kleiner als ^{3}H-Gehalt in Niederschlag vor Kernwaffenversuchen (vor 1950 ca. 5,5 ± 0,7 TU, 1959 ^{3}H im Niederschlag bereits das 100-fache)
- ☆ beprobtes Tiefenwasser spätestens 1949 infiltriert, wahrscheinlich Jahrzehnte früher
- ☆ **Existenz einer vergleichsweise „alten" GW-Komponente im geklüfteten Granit**
- ☆ Einbeziehung für Mischungsberechnung an Wettinquelle

Mischungsberechnung an der Wettinquelle

Grundlagen

- Probenahme 2/2001:
  Röthenbach (Schneeschmelzperiode) auf ^{3}H und Lf,
  2 Tage nach Scheitel Beprobung Wettinquelle bei Q_{max}
- Basis: zur Absenkphase in 6/1999 an Wettin-Quellsohle bestimmte Parameter der Mischwasserkomponenten Q_m (Anteil α_m)
  → im HQ-Fall gemischt mit „kurzzeitig" zusitzender Jungwasserkomponete Q_{jk}
  → Q_{jk} charakterisiert durch Messwerte ^{3}H und Lf des Röthenbaches
- Es gilt:

$$\alpha_m + \alpha_{jk} = 1, \quad (1)$$
$$C(^3H) = \alpha_a \cdot C(^3H)_m + \alpha_{jk} \cdot C(^3H)_{jk}, \quad (2)$$
$$Lf = \alpha_m \cdot Lf_m + \alpha_{jk} \cdot Lf_k, \quad (3)$$
$$Q = Q_m + Q_{jk}, \quad (4)$$
$$\text{mit } Q_m = \alpha_m \cdot Q \text{ bzw. } Q_{jk} = \alpha_{jk} \cdot Q. \quad (5)$$

Dabei sind $C(^3H)$, Lf, und Q ... ^{3}H-Konzentration, Lf bzw. Schüttung der Wettinquelle,
α ... Anteil der entspr. Alterskomponenten (indiziert),
m ... Mischwasserkomponente,
jk ... kurzzeitig zusitzende Jungwasserkomp. im HQ-Fall.

- Q_m = **Mischung** aus altem, tritiumfreien Tiefenwasser Q_a und einer jungen, permanent zufließenden Komponente Q_{jp} (aus Granitzersatzzone bzw. aus oberen Teil des Kluftsystems)
- Analog Gl. 1 und 2 - Abschätzung Anteil dieser alten Komponente α_a an Q_m:

$$C(^3H)_m = \alpha_a \cdot C(^3H)_a + (1-\alpha_a) \cdot C(^3H)_{jp}.$$

mit $C(^3H)_m$ ... 4.3 TU (Trockenwetterbeprobung)
$C(^3H)_a$ ... 0 TU (Tiefenwasser)
$C(^3H)_{jp}$ ... 15 - 20 TU (Tritiummodellierung)

Vereinfachende Voraussetzung: Q_a / Q_{jp} = konstant

☆ α_a = 60 – 85 %