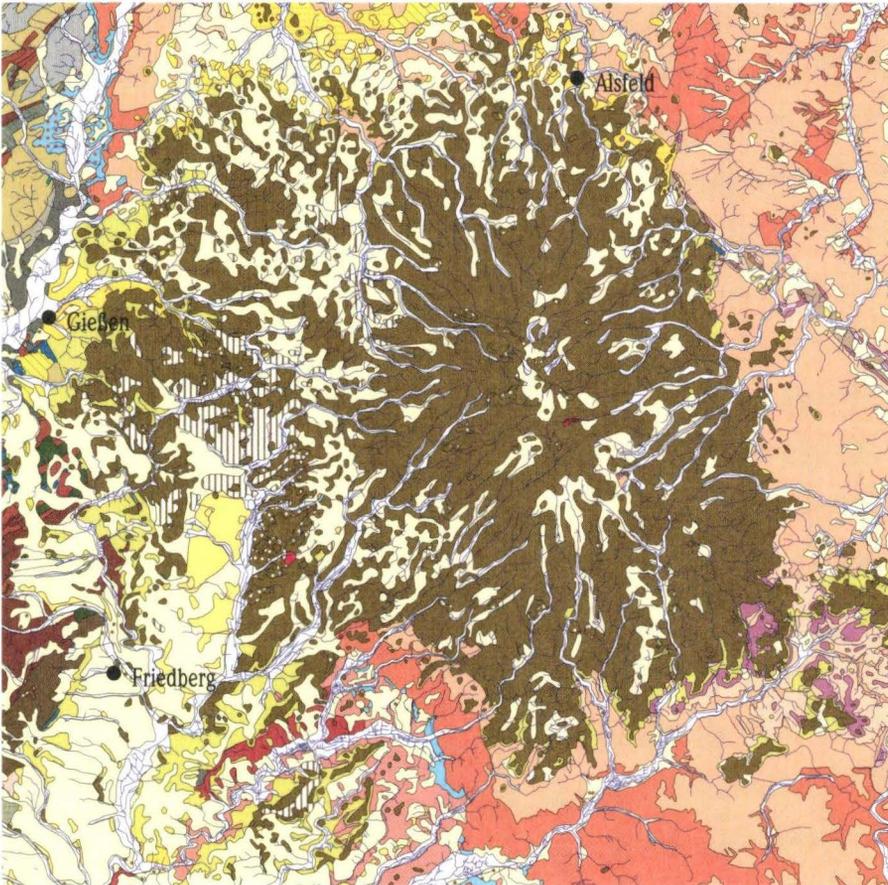




Geologische Abhandlungen Hessen, Band 108

# Die Hydrogeologie des vulkanischen Vogelsberges



VON BERND LEBMANN, KLAUS WIEGAND & HANS-JÜRGEN SCHARPFF



Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie

Geologische Abhandlungen Hessen, Band 108: 144 Seiten, 65 Abb., 13 Tab., Wiesbaden 2001  
ISBN 3-89531-810-8  
ISSN 0341-4043

# **Die Hydrogeologie des vulkanischen Vogelsberges**

von Bernd Leßmann, Klaus Wiegand & Hans-Jürgen Scharpff

---



Hessisches Landesamt  
für Umwelt und Geologie

Schriftleitung  
Dr. Roland E. Becker  
Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie  
Rheingaustraße 186, D-65203 Wiesbaden

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Die Hydrogeologie des vulkanischen Vogelsberges / HLOG, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Von Bernd Leßmann, Klaus Wiegand & Hans-Jürgen Scharpff. - Wiesbaden : HLOG, 2001  
(Geologische Abhandlungen Hessen ; Bd. 108)  
ISBN 3-89531-810-8

Die vorliegende Arbeit ist eine erweiterte Fassung der von Bernd Leßmann beim Fachbereich D17 der Technischen Universität Darmstadt eingereichten Dissertation. Die Dissertation wurde von Prof. Dr. Bernward Hölting (Mainz) und von Prof. Dr. Götz Ehardt (TU Darmstadt) betreut.

Titelbild:  
Ausschnitt der Geologischen Übersichtskarte (GÜK 300) Hessen

Hinweis für Autoren  
Manuskripte sind entsprechend den „Bonner Anweisungen“ abzufassen: Richtlinien für die Verfasser geowissenschaftlicher Veröffentlichungen. Ausgearbeitet von S. Horatschek und T. Schubert, 51 S.; Hannover 1998.  
Zu beziehen durch E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Johannesstraße 3A, D-70176 Stuttgart.

© Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden 2001  
ISBN 3-89531-810-8  
ISSN 0341-4043

Printed in Germany

Für den Inhalt der Arbeit sind die Autoren allein verantwortlich.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Übersetzung, Nachdruck, Vervielfältigung auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege sowie Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen – auch auszugsweise – nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without permission of the publisher.

Redaktion: Monika Retzlaff, Dagmar Tangermann  
Kartografie: Michaela Hoffmann  
Herstellung: Druckhaus „Thomas Müntzer“ GmbH  
Neustädter Straße 1–4  
D-99947 Bad Langensalza  
gedruckt auf chlor- und säurefreiem Papier

Herausgeber,  
© und Vertrieb: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie  
Rheingaustraße 186, D-65203 Wiesbaden  
Telefon: 06 11/70 1034; e-mail: [vertrieb@hlog.de](mailto:vertrieb@hlog.de)  
Telefax: 06 11/9740 813

# Die Hydrogeologie des vulkanischen Vogelsberges

## Kurzfassung

Mit der vorliegenden Arbeit wird die Hydrogeologie des vulkanischen Vogelsberges untersucht, eines der ergiebigsten Förder- und Reservegebiete für Grundwasser in Hessen. Das mehrschichtige Klufft Grundwasserleitersystem wird unter Verwendung geologischer, geohydraulischer, hydrologischer, hydrochemischer, isotopehydrologischer und wasserwirtschaftlicher Daten beschrieben.

Neben der Auswertung von bereits vorhandenen Daten wurden Grundwasseraustritte und Trockenfallstrecken kartiert sowie Niedrigwasserabflüsse gemessen. Da zahlreiche regionale und überregionale Wasserwerke Grundwasser zur Trinkwasserversorgung aus der Region fördern, wurden umfangreiche wasserwirtschaftliche Daten erhoben. Weiterhin wurden hydrochemische und isotopehydrologische Analysen durchgeführt.

Der Vogelsberg ist hydrogeologisch in die Zonen des Oberwaldes, der Schwebenden Grundwasserstockwerke und der Durchgehenden Grundwasser-sättigung untergliedert. Der Wechsel von Grundwasser leitenden mit Grundwasser gering leitenden bzw. Grundwasser nicht leitenden Schichten führt

zur Ausbildung von mehreren übereinander liegenden Grundwasserstockwerken, die über der Zone der Durchgehenden Grundwasser-sättigung schwebende Grundwasserstockwerke sind. Es wurde eine zeitbezogene Zuordnung der Wassergewinnungsanlagen und Grundwassermessstellen zu einzelnen Grundwasserpotenzialflächen vorgenommen.

Das räumliche Abflussverhalten der Fließgewässer in der Vogelsberg-Region spiegelt den hydrogeologischen Aufbau und damit die Grundwasserstockwerksgliederung wider. Die Abflüsse geben Aufschluss über die hydraulische Anbindung der Vorflut an die Grundwasserstockwerke.

Die meteorischen Grundwässer und die Vorratswässer des Vogelsberges gehören einem Erdalkali-Hydrogencarbonat-Typ an. Die mittleren Verweilzeiten liegen hier bei wenigen Jahren bis Jahrhunderten. Bei den tiefen Grundwässern handelt es sich um Alkali-Hydrogencarbonat-Wässer, die mehrere tausend Jahre alt sind.

Bei Quellen, die oberflächennahes Grundwasser führen, wurde vereinzelt eine Al-Mobilisation festgestellt, die auf saure Depositionen zurückgeht.

## Abstract

The working area of this hydrogeological study are the Tertiary volcanics of the Vogelsberg in central Hessen (Germany). The Vogelsberg is one of the most important ground-water reservoirs in Hessen,

supplying the metropolis of Frankfurt and its surroundings with water. Geology, geohydraulics, hydrology, hydrochemistry, isotope hydrology and water economy of this joint multiaquifer system are described.

<sup>1</sup> Dr. B. Leßmann, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Rheingaustraße 186, D-65203 Wiesbaden

<sup>2</sup> Dr. K. Wiegand, Robert-Koch-Straße 3, D-65232 Taunusstein

<sup>3</sup> Dr. H.-J. Scharpff, Rilkestraße 7, D-65207 Wiesbaden

For understanding the complicated hydrogeological system of the Vogelsberg area, it was necessary to reprocess existing data and to develop new hydrogeological maps. Springs and brooks have been mapped, low-water discharges were gauged. Numerous local and regional water works exploit groundwater for drinking-water supply. Their deliveries are investigated. Hydrochemistry and isotopic composition of groundwater samples are analysed.

The underground of the Vogelsberg is built of three hydrogeological zones: the Oberwald zone, the zone of the perched groundwater storeys and the deep saturated ground-water zone. The multiaquifer system results from the alternate bedding of aquifers, aquitards and aquifuges. Over the deep saturated groundwater zone water occurs as perched groundwater, contained in several water bearing

units. Wells and measuring points are assigned to different potentiometric surfaces in time.

The spatial stream pattern in the volcanic Vogelsberg area results from the multiaquifer formation. The run-off gives hydraulic informations about the relationship between streams and groundwater storeys.

The analysed near-surface groundwater samples belong to an alkaline earth-hydrogencarbonate-type. The mean residence time amounts from some years to decades. Separately, some analyses from deep groundwater samples show components which are several thousand years old. These samples belong to a second groundwater type: the alkaline-hydrogencarbonate-type.

Aluminum above the critical value is observed at springs with groundwater close to the surface, thus being caused by mobilization from acid deposits.

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung (H.-J. Scharpff)	9
2. Untersuchungsgebiet (B. Leßmann)	11
2.1 Geographische und naturräumliche Einordnung	11
2.2 Klima	13
3. Geologische Übersicht (B. Leßmann)	15
3.1 Historischer Abriss über die Diskussion zur Tektonik im Gebiet des Vogelsberges	15
3.2 Prävulkanische Abfolge	19
3.3 Vulkanische Abfolge	20
3.4 Basaltische Verwitterung und Lagerstätte	25
4. Böden (B. Leßmann)	27
5. Methodik (B. Leßmann & H.-J. Scharpff)	29
5.1 Vorbereitende Datenrecherchen und erste Geländebegehung	29
5.2 Hydrogeologische Kartierung	31
5.2.1 Grundwasseraustrittskartierung	31
5.2.2 Gewässerkartierung und Abflussmessungen	32
5.3 Wassergewinnungsanlagen und Grundwassermessstellen	34
5.4 Datenerhebung zur Grundwasserbeschaffenheit und Isotopenhydrologie	35
6. Hydrogeologie (B. Leßmann & K. Wiegand)	36
6.1 Stand der Forschung	36
6.1.1 Hydrogeologische Modellvorstellungen von Vulkanitkomplexen	36
6.1.2 Hydrogeologische Erforschung des Vogelsberges	41
6.1.3 Wasserwirtschaftlicher Hintergrund	42
6.2 Grundwassererschließung und Grundwasserförderung	44
6.3 Hydrogeologische Zonen	46

6.3.1 Grundwasseraustritte	46
6.3.2 Schüttungsverhalten von Grundwasseraustritten	49
6.4 Grundwasserstockwerksbau	53
6.4.1 Grundwasserstockwerke	53
6.4.2 Bohrungen	60
6.4.2.1 Forschungsbohrung Ulrichstein	60
6.4.2.2 Geophysikalische Bohrlochuntersuchungen in mehrschichtigen Kluffgrundwasserleitersystemen unterschiedlicher Gesteine	64
6.4.2.3 Bohrungsdichte und Brunnenleistungen	66
6.4.2.4 Grundwasserstandsganglinien	69
6.4.2.5 Auswirkungen von Grundwasserentnahmen in der Grundwasserstockwerksabfolge	75
6.5 Einfluss des Grundwasserstockwerksbaues auf den Abfluss von Fließgewässern	79
6.5.1 Abflussprofil Hundsbach/Horstbach/Bracht	79
6.5.2 Trockenfallstrecken	80
6.6 Grundwasserfließrichtungen	83
<b>7. Wassergewinnung (B. Leßmann)</b>	<b>87</b>
7.1 Wassergewinnungsanlagen	87
7.2 Grundwasserschutz	93
<b>8. Wasserhaushalt (B. Leßmann)</b>	<b>95</b>
8.1 Abflussspenden und Abflussabgaben	95
8.2 Grundwasserhaushalt	99
8.2.1 Grundwasserneubildung	99
8.2.2 Verdunstung und oberirdischer Abfluss	103
8.2.3 Abflussspendendifferenzen zwischen 60er und 90er Jahren	104
8.3 Anthropogene Eingriffe in den Wasserhaushalt	106
<b>9. Grundwasserbeschaffenheit (B. Leßmann)</b>	<b>115</b>
9.1 Grundwassertypisierung	115
9.2 Auswirkungen saurer Depositionen auf das Grundwasser	119
9.3 Konzentrationen von Cd, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb und Zn	123
9.4 Redox-Potenziale und Lösungsinhalte	124
9.5 Isotopenhydrologische Untersuchungen	126
<b>10. Zusammenfassung (B. Leßmann)</b>	<b>129</b>
<b>11. Schriftenverzeichnis</b>	<b>132</b>
<b>12. Anmerkungen zum Inhalt der CD-ROM (H.-J. Scharpff)</b>	<b>140</b>
<b>13. Anlage: CD-ROM</b>	<b>144</b>

## Liste der Abbildungen und Tabellen

**Abb. 2-1.** Naturräumliche Gliederung nach Klausning (1988) mit geologischer Übersichtskarte auf Grundlage der GÜK 300 von Hessen.

**Abb. 2-2.** Mittlere monatliche Niederschlagshöhen, Station Herchenhain (608 m ü. NN), Messzeitraum 1891–1955.

**Abb. 2-3.** Mittlere jährliche Niederschlagshöhe in [mm], Periode: 1891 – 1955, aus Klima von Hessen (1981–1985).

**Abb. 2-4.** Jahresniederschlag, Station Ulrichstein (567 m ü. NN), Messzeitraum: 1960 – 1994.

**Abb. 3-1.** Schwellen, Becken und Hauptfließrichtungen der Basalte im Vogelsberg-Gebiet nach Brinkmann (1968).

**Abb. 3-2.** Die Basaltbasis des Vogelsberges nach Ehrenberg & Hickethier (1985).

**Abb. 3-3.** SW-NE-Schnitt durch den Vogelsberg aus Dreher (1996, nach Ehrenberg & Hickethier 1985).

**Abb. 3-4.** Map view showing the extend of the low (less than the global mean) S-wave velocity anomaly (LVA) at depths of 100, 300 and 500 km. Where the LVA intersects the base of the lithosphere, it covers an area of 2,500 x 4,000 km, extending from the Eastern Atlantic volcanic province (WMVP) and the central European volcanic province (CEVP). The LVA becomes narrower at depth, as is indicates by the 300- and 500-km depth contours, and dips to the WNW. Volcanic provinces are denoted by shading (Hoernle et al. 1995).

**Abb. 3-5.** Übersichtskarte des mittleren und südlichen Mitteleuropas mit Groß-Bruchsystemen, känozoischen Vulkangebieten und Erdbeben-Zonen nach Murawski (1990).

**Abb. 5-1.** Flügelmessverfahren.

**Abb. 5-2.** Anemometermessverfahren.

**Abb. 6-1.** Schematischer hydrogeologischer Schnitt für die Hawaii-Inseln (Stearns & MacDonald 1946, geändert von Davis & DeWiest 1967).

**Abb. 6-2.** Ground-water areas and potentiometric surface in the principal volcanic aquifers of the island of Oahu (compiled from previous studies by the U.S. Geological Survey), Hunt (1996).

**Abb. 6-3.** Schematischer hydrogeologischer Schnitt durch den Nordteil von La Palma (Servicio Hidráulico 1992, geändert von König 1997).

**Abb. 6-4.** Schematischer Schnitt durch den westlichen Vogelsberg (Wiegand 1977).

**Abb. 6-5.** Schematische Darstellung der Eingriffsintensitäten (EI) bei einer Grundwasserförderung mit gleichbleibender Fördermenge (AHU 1995).

**Abb. 6-6.** Untersuchungen und Vorgehensweise bei der umweltschonenden Grundwassergewinnung im Vogelsberg (Leßmann et al. 2000, überarbeitet nach AHU 1995).

**Abb. 6-7.** Der Bau von Wassergewinnungsanlagen seit 1840.

**Abb. 6-8.** Verteilung der Grundwasseraustritte nach TK 25.

**Abb. 6-9.** Schematische Darstellung der hydrogeologischen Zonen des Vogelsberges (Leßmann & Wiegand 1998).

**Abb. 6-10.** Hoherodskopfquelle, 1,5 km nordöstlich Breungeshain, Landesgrundwasserdienstmessstelle 461502.

**Abb. 6-11.** Heegholzquelle, am südwestlichen Ortsrand Ilbeshausen, Landesgrundwasserdienstmessstelle 461503.

**Abb. 6-12.** Quelle Sichenhausen, Landesgrundwasserdienstmessstelle 486518.

**Abb. 6-13.** Schematische Darstellung von schwebenden, gespannten und ungespannten Grundwasservorkommen (Mattheß und Ubell 1983, nach Brown et al. 1975 und Davis & DeWiest 1967).

**Abb. 6-14.** Schematisches hydrogeologisches Blockbild eines mehrschichtigen Kluftgrundwasserleitersystems (Leßmann & Wiegand 1998).

**Abb. 6-15.** Grundwasserpotenziale, Teilausschnitte 1 bis 7 siehe Abb. 6-16 bis 6-22.

**Abb. 6-16.** Grundwasserpotenziale, Teilausschnitt 1.

**Abb. 6-17.** Grundwasserpotenziale, Teilausschnitt 2.

- Abb. 6-18.** Grundwasserpotenziale, Teilausschnitt 3.
- Abb. 6-19.** Grundwasserpotenziale, Teilausschnitt 4.
- Abb. 6-20.** Grundwasserpotenziale, Teilausschnitt 5.
- Abb. 6-21.** Grundwasserpotenziale, Teilausschnitt 6.
- Abb. 6-22.** Grundwasserpotenziale, Teilausschnitt 7.
- Abb. 6-23.** Verteilung der Bohrungen und Bohrmeter im Arbeitsgebiet, gegliedert nach TK 25.
- Abb. 6-24.** Leistungs-Absenkungs-Quotienten (Lq) von Pumpversuchen an Brunnen.
- Abb. 6-25.** Verteilung der Leistungs-Absenkungs-Quotienten (Lq).
- Abb. 6-26.** Wasserspiegel in Abhängigkeit von den Durchlässigkeiten einzelner Grundwasserleiter.
- Abb. 6-27.** Darstellung einer hydraulischen Simulation (Modflow) für die Ausbildung von Mischwasserspiegeln bei der hydraulischen Verbindung von zwei Grundwasserstockwerken mit gleichen bzw. unterschiedlichen Durchlässigkeiten durch eine Grundwassermessstelle.
- Abb. 6-28.** Wasserstandsganglinie der Landesgrundwasserdienstmessstelle Beltershain (461024), wöchentlicher Messturnus.
- Abb. 6-29.** Wasserstandsganglinie der Landesgrundwasserdienstmessstelle Lauter (461032), wöchentlicher Messturnus.
- Abb. 6-30.** Wasserstandsganglinie der Landesgrundwasserdienstmessstelle Villingen (461009), wöchentlicher Messturnus.
- Abb. 6-31.** Schematische Darstellung von Grundwasserentnahmen in einem mehrschichtigen Grundwasserleitersystem.
- Abb. 6-32.** Abflussprofil Hundsbach/Horstbach/Bracht (Leßmann et al. 2000).
- Abb. 6-33.** Elektrische Leitfähigkeit und Abfluss des Abflussprofils Hundsbach/Horstbach/Bracht.
- Abb. 6-34.** Trockenfallstrecken.
- Abb. 6-35.** Allgemeine Grundwasserfließrichtungen in der Zone der Durchgehenden Grundwassersättigung.
- Abb. 6-36.** Die Wirkung eines Taleinschnittes mit Vorflutfunktion als hydraulische Barriere.
- Abb. 7-1.** Verteilung der Fördermengen für das Jahr 1995, gegliedert nach Betreibern.
- Abb. 7-2.** Wassergewinnungsanlagen, überregionale Wasserwerke mit Fördermengen [ $\text{m}^3/\text{a}$ ] für das Jahr 1995.
- Abb. 7-3.** Bewilligte und geförderte Wassermengen [ $\text{m}^3/\text{a}$ ] für 1995, 1996 und 1997 von überregionalen Wasserwerken.
- Abb. 8-1.** Abflussspenden und Abflussabgaben ( $q_{\text{reell}}$ , 90er Jahre).
- Abb. 8-2.** Abflussspenden und Abflussabgaben ( $q_{\text{reell}}$ , 1962) nach Mattheß (1970).
- Abb. 8-3.** Niederschlagsstation Grebenhain, Vergleich der hydrologischen Winterhalbjahre 1959/60 bis 1963/64 mit 1989/90 bis 1993/94.
- Abb. 8-4.** Differenzen der Abflussspenden ( $q_{\text{reell}}$ ) zwischen 90er und 60er Jahren.
- Abb. 8-5.** Dränungsübersicht Gemarkung Herchenhain, Stand April 1996.
- Abb. 8-6.** Dränungsübersicht Gemarkung Ober-Seemen, Stand April 1996.
- Abb. 8-7.** Dränungsübersicht Gemarkung Burgbracht, Stand April 1996.
- Abb. 8-8.** Dränungsübersicht Gemarkung Schlierbach, Stand April 1996.
- Abb. 9-1.** Piper-Diagramm von Rohwasseranalysen (1990 – 1994).
- Abb. 9-2.** Dreiecksdiagramm der Wasserhärten [ $^{\circ}\text{dH}$ ] für Wasser aus der Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke und der Zone der Durchgehenden Grundwassersättigung.
- Abb. 9-3.** Elektrische Leitfähigkeit.
- Abb. 9-4.** Redox-Potenziale und pH-Werte der Vogelsbergwässer in einem Diagramm häufig vorkommender  $E_{\text{h}}$ /pH-Bedingungen natürlicher Wässer (verändert nach Hötling 1996).
- Abb. 9-5.**  $^{14}\text{C}$ -Werte.
- Abb. 9-6.**  $^3\text{H}$  -  $^{14}\text{C}$ -Diagramm.
- Abb. 12-1.** CD-Kartenausschnitt.

- Tab. 6-1.** Hydrogeologische Auswertung der Kamerabefahrung Forschungsbohrung Ulrichstein/Vogelsberg.
- Tab. 7-1.** Verteilung genutzter und ungenutzter Wassergewinnungsanlagen.
- Tab. 7-2.** Fördermengen genutzter Wassergewinnungsanlagen, gegliedert nach Betreibern.
- Tab. 8-1.** Gewässerkundliche Hauptzahlen.
- Tab. 8-2.** Grundwasserneubildung, ohne Berücksichtigung der überregionalen Grundwasserentnahmen.
- Tab. 8-3.** Flächennutzungsanalysen.
- Tab. 9-1.** Alkali-Hydrogenkarbonat-Wasser, Forschungsbohrung Ulrichstein.
- Tab. 9-2.** Ionenverhältnisse einiger Mineralwässer und Erdalkali-Hydrogencarbonat-Wässer aus dem Arbeitsgebiet.
- Tab. 9-3.** Einstufung der Böden nach dem pH (CaCl<sub>2</sub>)-Wert, aus Scheffer & Schachtschabel (1992).
- Tab. 9-4.** Übersicht über die pH-Werte des Untersuchungsmessprogrammes.
- Tab. 9-5.** Isotopenhydrologisch beprobte Brunnen und Grundwassermessstellen.
- Tab. 9-6.** Radiokohlenstoffalter.
- Tab. 12-1.** Thematische Inhalte der CD-ROM.

# 1. Einleitung

Der Vogelsberg, im Zentrum Hessens gelegen, ist in den letzten Jahrzehnten von zahlreichen Fragestellungen her in den Vordergrund des öffentlichen Interesses gerückt. Als weitgehend naturnah gebliebener, überwiegend landwirtschaftlich und forstwirtschaftlich genutzter Raum hat er einerseits als reizvolles Naherholungsgebiet für die schnell wachsende Bevölkerung des nahe gelegenen Rhein-Main-Gebietes zunehmende Bedeutung. Andererseits führte gerade die intensive Wirtschaftsexpansion in Süd-Hessen auch im Vogelsberg zu einer Zunahme von Nutzungskonflikten. Hierbei steht die Bedeutung seines Untergrundes als ergiebiger Grundwasserleiter an vorderer Stelle. Hatte beim Ausbau der überregionalen Wasserversorgung für den Großraum Frankfurt nach dem letzten Weltkrieg zunächst die Erschließung der größten hessischen Wasserreserven im südlich gelegenen Oberrheingraben, dem „Hessischen Ried“, den Vorrang, so begann schon in den 60er Jahren die entsprechende systematische Erkundung und Erschließung des Vogelsberges, der als eines der größten zentraleuropäischen Vulkangebiete hierfür sehr gute hydrogeologische Voraussetzungen bot. Grundlegende Erfahrungen der Fernwasserversorgung lagen hier bereits seit dem 19. Jahrhundert durch den Betrieb des „Quell-Wasserwerkes Fischborn“ und des „Pumpwerkes Inheiden“ vor.

Der Wechsel von einem früher überwiegend wirtschaftlich orientierten Wassergewinnungskonzept zu dem heutigen, stark ökologisch orientierten Lösungsansatz der Wassergewinnung begann im Rhein-Main-Gebiet mit den niederschlagsarmen Jahren um 1976, während deren es im Einflussbereich der Großwasserwerke im Hessischen Ried zu außergewöhnlichen Grundwasserabsenkungen, verbunden mit Trocknisschäden an Auenwäldern und Setzungsschäden an Bauwerken kam.

Die Sorge um ähnliches „Austrocknen des Vogelsberges“ und eine Entwicklung zur „Schafweide“ beantwortete der Hessische Landtag, begleitend zur Fertigstellung der ersten neuen Großwasserwerke, schon 1975 mit der Gründung der „Kommission Wassergewinnung im Vogelsberg“. Sie sollte neben den verfahrensverantwortlichen Verwaltungs- und Fachbehörden örtliche Gebietskörperschaften und betroffene Verbände als beratende Institutionen einbinden und so die wasserwirtschaftlichen Entscheidungen und fachlichen Hintergründe transparent machen.

Für die fachliche Bewertung geologischer und hydrogeologischer Fragestellungen war von Anfang an das ehemalige Hessische Landesamt für Bodenforschung\* (HLfB, seit 01.01.2000 als Abteilung Geologie und Boden im Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie - HLUg) als Fachbehörde verantwortlich. Die wasserwirtschaftliche Seite wird neben den zuständigen Wasserbehörden von den überörtlichen Wasserversorgern, z.B. „Oberhessische Versorgungsbetriebe AG (OVAG)“ und „Wasserverband Kinzig“ sowie von mehreren Einzelwasserversorgern der örtlichen Kommunen wahrgenommen.

Die Menge des im Vogelsberg von den überörtlichen Betreibern im Jahr 1976 gewonnenen Trinkwassers betrug rd. 52 Mio. m<sup>3</sup>. Aus damaliger Sicht wurde für das Jahr 2000 zunächst eine Bilanzmenge von rd. 164 Mio. m<sup>3</sup> geplant (Regierungspräsident in Darmstadt 1976: Trinkwasser aus dem Vogelsberg). Besonders hervortretende Einzelereignisse waren die Inbetriebnahmen der neuen Wasserwerke (Jahr der Inbetriebnahme und Anfangsförderrate in Klammern) Nidda-Kohden und Nidda-Orbes (1965, 1,89 Mio. m<sup>3</sup>/a), Schotten-Rainrod (1972, 7,9 Mio. m<sup>3</sup>/a), Gedern-Merkenfritz (1976, 3,5 Mio. m<sup>3</sup>/a), Brachtal-Neuensmidten (1977, 2,5 Mio. m<sup>3</sup>/a) und Birstein-Kirchbracht (1985, 1,1 Mio. m<sup>3</sup>/a). Dagegen werden mehrere

\*Am 1.1.2000 wurde das Hessische Landesamt für Bodenforschung (HLfB) mit der Hessischen Landesanstalt für Umwelt (HLfU) zum Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) fusioniert, die beiden ehemals selbstständigen Dienststellen wurden damit aufgelöst.

bereits eingehend durch Pumpversuche als ergiebig nachgewiesene potenzielle Wassergewinnungsgebiete in den Tälern der Felda, Salz und oberen Gründau bis heute wegen ökologischer Bedenken nicht genutzt.

Seit Beginn der Planungen wurde in allen Fördergebieten hoher Aufwand bei der Beweissicherung zur Beschreibung der Förderauswirkungen betrieben. Dabei richtete sich das Interesse zunächst bevorzugt auf die Klärung der hydrogeologischen Kenngrößen der jeweils genutzten Grundwasserleiter, besonders der entnahmebedingten Grundwasserstandsänderungen, der Reichweite des Absenkungsbereiches und des Einzugsgebietes. Dies beinhaltete bereits vor Inbetriebnahme der Wasserwerke die Beobachtung eines ausgedehnten Netzes von tiefen, die genutzten Grundwasserstockwerke erschließenden Grundwassermessstellen und gutachterliche Betrachtungen möglicher Negativauswirkungen auf landwirtschaftliche, forstwirtschaftliche und bauliche Nutzungen. Die Gesamtzahl dieser vorwiegend vom ehemaligen HlFB erstellten Gutachten belief sich auf über 150. Die Grundprinzipien der geologischen, hydrogeologischen und hydrochemischen Verhältnisse im Vogelsberg und ihre grundsätzliche Bedeutung wurden von Wiegand (1977) zusammenfassend aufgezeigt und im Maßstab 1 : 25 000 von Scharpf (1988) in Verbindung mit der Herausgabe der GK 25, Bl. Wenings, für einen Teilbereich exemplarisch dargestellt.

Trotzdem ließ der zwischenzeitlich weltweit durch die AGENDA 21 verfeinerte Erkundungsbedarf zur ökologisch verträglichen und nachhaltigen Wassergewinnung (vgl. Bundesgesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts - Wasserhaushaltsgesetz - WHG; 1996) im Vogelsberg zahlreiche Informationsdefizite bei der Darstellung bekannter und bei der Ermittlung vermuteter grundwasserbürtiger Gefahrenpotenziale, besonders auch für Biotope erkennen.

Die hierfür erforderliche flächendeckende Übersicht bereits vorliegender, jedoch verstreut dokumentierter Einzelinformationen wurde im Auftrag des ehemaligen Hessischen Ministeriums für Umwelt und Reaktorsicherheit, heute Hessisches Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft

und Forsten (HMULF) als „Übergreifendes Gutachten zur Wassergewinnung im Vogelsberg“ im Jahre 1993 erstellt (AHU 1993). Hierbei wurden für die Bereiche der Großwasserwerke in Abhängigkeit vom Flurabstand der Grundwasseroberfläche grundsätzlich drei Zonen unterschiedlichen ökologischen Risikos ausgewiesen. Die empfohlenen Beweissicherungsmaßnahmen wurden nach detaillierter Konkretisierung in der „Umsetzung der umweltschonenden Wassergewinnung im Vogelsberg - Leitfaden zur Durchführung der Untersuchungen im Rahmen von Wasserrechtsanträgen“ (24.10.1995) seitens der hessischen Obersten Wasserbehörde (HMULF) als Basis für das weitere Vorgehen bei allen Wasserrechtsverfahren im Vogelsberg vorgegeben (AHU 1995, Kurzfassung des Leitfadens 1996).

Auch dieses Konzept ließ im hydrogeologischen Themenkreis besonders zwischen den Wasserwerken zahlreiche Informationslücken erkennen. Das ehemalige HlFB nahm daher im Rahmen seines originären Auftrages zur geologischen Landesaufnahme, die zumindestens seit 1963 auch immer hydrogeologische Landesaufnahme war, die flächendeckende hydrogeologische Kartierung des gesamten Vogelsberges als Pilotprojekt für die moderne und umfassende Erstellung einer Hydrogeologischen Karte Hessen 1 : 50 000 (HK 50) in Angriff. Hierdurch sollten naturwissenschaftliche Grundlagen für wasserwirtschaftliche und naturschutzrechtliche wie auch politische Entscheidungen erarbeitet werden.

Hierzu wurde nach zwei mehrjährigen Probestadien (1.: Gebiet der TK 50, Bl. Schotten, 530 km<sup>2</sup>, Leßmann 1995; 2.: Bereich der großen Wassergewinnungsgebiete im südwestlichen Vogelsberg, 1653 km<sup>2</sup>, Leßmann 1997) das endgültige Konzept auf die gesamte Vogelsberg-Region (vulkanischer Vogelsberg und seine Randgebiete) mit 3300 km<sup>2</sup> Fläche ausgedehnt.

Die Vorgehensweise knüpfte an die über 40 Jahre alte Tradition des ehemaligen HlFB an, jeder neu erscheinenden Geologischen Karte (GK 25) einen hydrogeologischen Erläuterungsteil beizufügen, der auf einer aktuellen hydrogeologischen Aufnahme der oberirdischen Gewässer, der Grundwasseraustritte, begleitend durchgeführten

Abflussmessungen und Probennahmen zur Grundwasserbeschaffenheit basiert (Erstprojekt: GK 25, Bl. 5223 Queck; Mattheß, G. & Thews, J.-D., 1963). Auf den methodischen und regionalen Erfahrungen des ehemaligen HfB aufbauend wurden deshalb auch in der Vogelsberg-Region zunächst die Teilbereiche mit hohem Personaleinsatz (bis zu 20 Personen gleichzeitig) jeweils in kurzen Zeiträumen hydrogeologisch kartierend begangen, alle hydrogeologisch relevanten Objekte erfasst, an allen oberirdischen Gewässern Abflussmessungen ausgeführt, Grundwasserbeschafftheitsproben entnommen und die Ergebnisse schließlich mit den Unterlagen verschiedener Archive zusammengeführt. Die Zusammenstellung umfasst u.a. neben den wichtigsten Angaben zu 3963 Grundwasseraustritten die Stammdaten von 6134 Bohrungen. Als Gesamtergebnis wird somit eine weitgehend „simultane“ hydrogeologische Aufnahme des Gesamtgebietes mit geologischer und hydrogeologischer Interpretation vorgelegt.

Die große Fülle der Daten übersteigt die herkömmlichen Möglichkeiten der Darstellung in ge-

druckten Tabellen und Karten. Diesem Nachteil wird vom HfUG erstmalig durch Erstellung einer CD-ROM als Anhang zum Textteil begegnet, von der mit Hilfe mitgelieferter Datenbank-Programme alle Themenkreise über Karten der Darstellungsbasis TK 50 bis ins Detail abgerufen werden können. Die entsprechenden Möglichkeiten sind in Kap. 12 beschrieben.

Hieraus resultiert die Momentaufnahme eines im hessischen geologischen Landesdienst kontinuierlich betriebenen und weiter andauernden Dokumentationsvorganges. Der systembedingte Fortschreibungsprozess der Archivdaten-Erfassung zieht aber unvermeidbar Lücken und - angesichts der großen Datenmenge - möglicherweise auch Fehler nach sich. Im Interesse des öffentlichen Informationsbedarfes wurde jedoch zu Gunsten einer möglichst umfassenden Veröffentlichung und damit einer breiten Verfügbarkeit der Daten entschieden. Die auf der CD vorhandenen Daten sollen in Zukunft weiter gepflegt werden. Daher ist das HfUG für Hinweise zu den auf der CD enthaltenen oder auch noch fehlenden Daten dankbar.

## **2. Untersuchungsgebiet**

### **2.1 Geographische und naturräumliche Einordnung**

Das im Tertiär entstandene Vogelsberg-Vulkangebiet befindet sich zentral in Hessen (Abb. 2-1). Der Vogelsberg hat die Form eines Schildvulkans; er setzt sich jedoch aus zahlreichen Einzelvulkanen zusammen und weist neben gering viskosen Laven mächtige pyroklastische Ablagerungen auf. Die vulkanischen Gesteine bedecken eine Fläche von rd. 2 300 km<sup>2</sup> und haben damit einen Anteil von rd. 11% an der 21 114 km<sup>2</sup> großen hessischen Landesfläche. Der Vogelsberg gehört mit dem mehr als 2 500 km<sup>2</sup> großen Cantal im Französischen Zentralmassiv (Rosenbaum 1992) zu den größten zusammenhängend aufgeschlossenen Vulkangebieten der zentraleuropäischen Vulkanprovinz (CEVP) (Abb. 3-4, Abb. 3-5).

Das Untersuchungsgebiet hat eine Ausdehnung von rd. 3 300 km<sup>2</sup>. Hiervon sind rd. 70% vulkanisch überdeckt. Die bearbeiteten, nicht vulkanisch über-

deckten Flächen (1 000 km<sup>2</sup>) umschließen das Vulkangebiet randlich.

Die höchsten Erhebungen im Vogelsberg sind die im Oberwald liegenden Gipfel des Taufsteins (773 m ü. NN), des Hoherodskopfes (764 m ü. NN), des Sieben Ahorns (755 m ü. NN) und der Herchenhainer Höhe (733 m ü. NN). Die Ränder des Gebirges reichen im Westen bis auf etwa 130 m ü. NN herab, während der Ostrand um 400 m ü. NN liegt.

Der Vogelsberg befindet sich nach der naturräumlichen Gliederung von Klausning (1988) in der Region des Hessischen Bruchschollen-Tafellandes. Der größte Teil des Arbeitsgebietes gehört zur Haupteinheitengruppe (in Abb. 2-1 nicht dargestellt) des Osthessischen Berglandes. Im Westen schließt sich das Westhessische Berg- und Senkenland sowie das Rhein-Main-Tiefland an. Der südliche Bereich des Arbeitsgebietes liegt im Hessisch-Fränkischen Berg-

land. Als Haupteinheiten (Abb. 2-1) sind die Fuldaer Senke, der Vordere Vogelsberg, der Hohe Vogelsberg, der Untere Vogelsberg, die Wetterau, der Büdinger Wald, das Büdinger-Meerholzer Hügelland und der Sandsteinspessart teilweise oder ganz betroffen. Die Haupteinheiten gliedern sich wiederum in Untereinheiten, welche den Vogelsberg ebenfalls zum größten Teil nur randlich schneiden.

Der Vogelsberg ist ein land- und forstwirtschaftlich geprägter Naturraum, in dem die Industrie von untergeordneter Bedeutung für das Landschaftsbild ist. Ein großer Teil des Arbeitsgebietes, besonders der Oberwald, der Büdinger Wald und die Bergrücken zwischen den teilweise tief eingeschnittenen Flussläufen, werden forstwirtschaftlich genutzt. Natürlich vorherrschend sind die Bu-

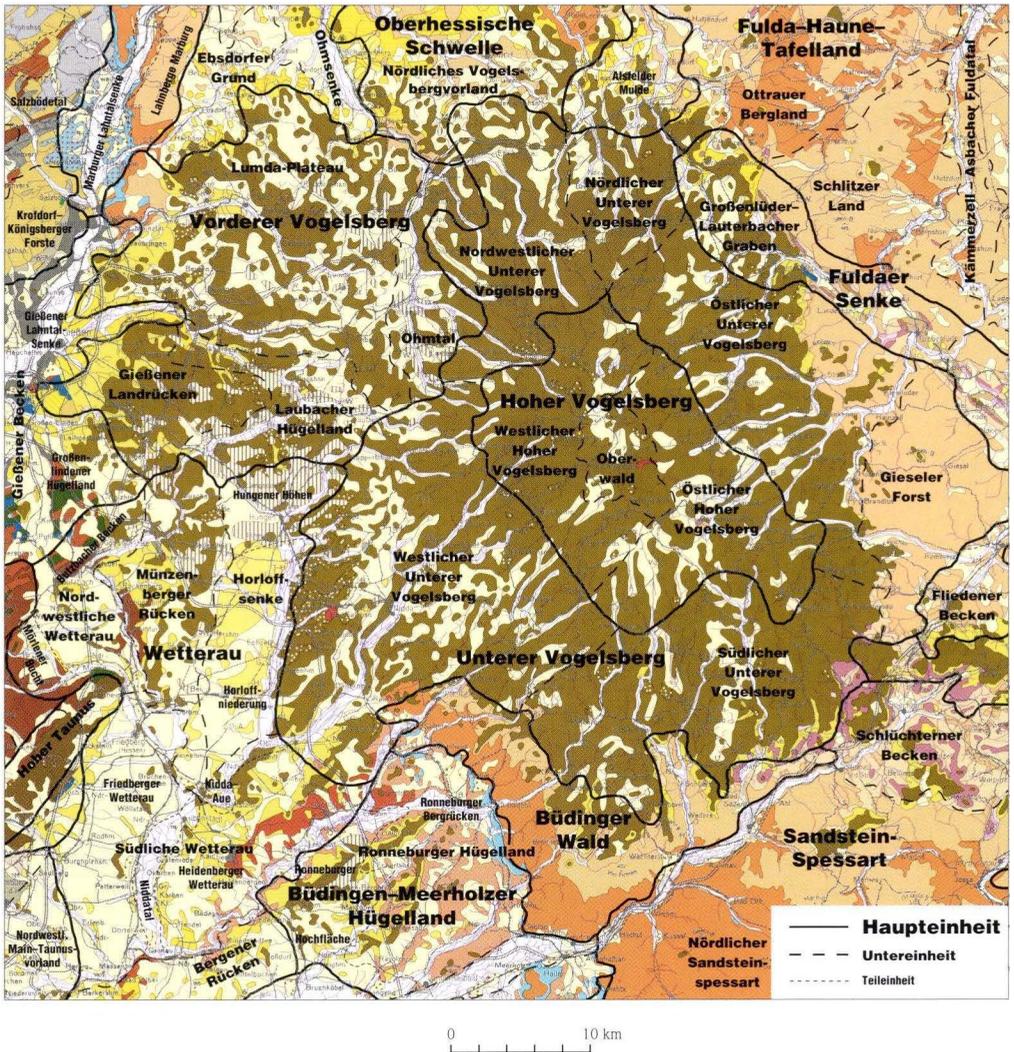


Abb. 2-1. Naturräumliche Gliederung nach Klausung (1988) mit geologischer Übersichtskarte auf Grundlage der GÜK 300 von Hessen.

chen-Zone und die Buchen-Mischwald-Zone. Es handelt sich zum überwiegenden Teil um eutrophe und mesotrophe Standorte. Bis auf ca. 450 m ü. NN herab überwiegt die Buchen-Zone, die jedoch besonders in Privatforstbereichen von Nadelhölzern verdrängt wurde. Unterhalb von ca. 450 m ü. NN herrscht die Buchen-Mischwald-Zone vor (Hessische Forsteinrichtungsanstalt 1992).

Die agrarische Landnutzung lässt eine Dreiteilung des Vogelsberges erkennen, welche im Wesentlichen von der Höhe und den damit verbundenen klimatischen Unterschieden abhängig ist. Im Bereich des Oberwaldes und anderer exponierter Standorte überwiegt eine forstwirtschaftliche Nutzung, die nur vereinzelt von Grünland unterbrochen wird. Vom Oberwald ausgehend nehmen erst die Grünlandbewirtschaftung und

dann die ackerbauliche Nutzung mit abnehmender Höhe zu. Besonders im Gebiet der westlichen und südlichen Verebnungsflächen dominiert der Ackerbau vor der Grünlandbewirtschaftung.

Der Vogelsberg verfügt, begründet durch seinen schildförmigen Habitus, über ein radialstrahliges Entwässerungssystem. Die oberirdische Hauptwasserscheide zwischen Rhein- und Wesergebiet verläuft über den Vogelsberg. Der Vorfluter 1. Ordnung – in Anlehnung an Wasserscheide 1. Unterteilung – ist im Osten zum Hauptvorfluter Weser die Fulda. Nach Süden ist der Vorfluter 1. Ordnung der Main mit seinen Zuflüssen Nidda und Kinzig (Vorfluter 2. Ordnung). Im Westen entwässern Ohm, Lumda und Wieseck (Vorfluter 2. Ordnung) in die Lahn (Vorfluter 1. Ordnung), die wie der Main in den Hauptvorfluter Rhein mündet.

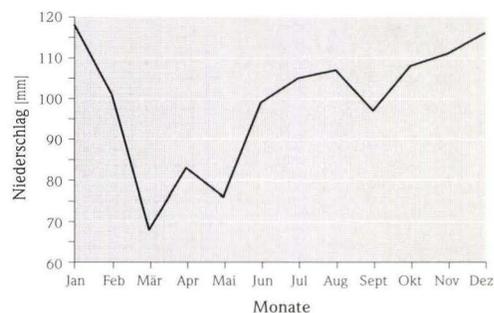
## 2.2 Klima

Nach der Klimaklassifikation von Köppen (in Klima von Hessen 1981–1985) gehört Hessen der Zone des warmgemäßigten Regenklimas an, bei der die Lufttemperaturen des wärmsten Monats im Mittel unter 22°C, die des kältesten Monats über -3°C bleiben.

Der Vogelsberg wird aufgrund seiner exponierten Lage und seiner Morphologie in zwei klimatische Zonen untergliedert. Die Niederungen mit Höhenlagen zwischen 100 und 300 m ü. NN sind durch niedrige Windgeschwindigkeiten, hohe Lufttemperaturen und relativ geringe Niederschlagshöhen gekennzeichnet. Der Hauptanteil des Niederschlages fällt in den Sommermonaten. Im Mittelgebirgsbereich über 300 m ü. NN werden höhere Windgeschwindigkeiten und den Höhen entsprechend niedrigere Temperaturen (etwa 0,5°C pro 100 Höhenmeter) erreicht. Der Hauptanteil des Niederschlages fällt im langjährigen Mittel während der Wintermonate. Besonders im Luv-Bereich kommt es wegen des niedrigen Kondensationsniveaus im Winter zu intensiven Niederschlägen. Die Niederschlagshöhen nehmen in Richtung der Kammlagen zu, wobei sich dort regelmäßig geschlossene Schneedecken bilden. Die Hochlagen über 600 m ü. NN tauchen in den Herbst- und

Wintermonaten oftmals in Schlechtwetterwolken ein. Dies bringt Nebelnässe bzw. Rauheif- oder Rauhfrostablagerungen mit sich.

Zyklonale Wetterlagen führen in der Vogelsberg-Region zu advektiven Verhältnissen. Durch den Stau und die hierdurch erzwungene Hebung der Luftmassen an der Luvseite des Gebirges fällt mit der Höhe mehr Niederschlag (Abb. 2-3). Die Isohyeten zeigen eine deutliche Wölbung nach NW und lassen dadurch die Hauptdurchzugsrichtung der niederschlagsreichen Wetterfronten erkennen. Klar tritt die Diskrepanz zwischen der nieder-



**Abb. 2-2.** Mittlere monatliche Niederschlagshöhen, Station Herchenhain (608 m ü. NN), Messzeitraum: 1891–1955.

schlagsarmen Wetterau (< 550 mm) und dem niederschlagsreichen Vogelsberg (> 1200 mm) hervor. Damit liegt eines der niederschlagsärmsten Gebiete Hessens direkt neben einem der niederschlagsreichsten.

Die Niederschlagsstationen des Vogelsberges gliedern sich in Sommerregentypen, Mittelgebirgstypen und Mischtypen. Die Station Herchenhain (608 m ü. NN) ist ein Mittelgebirgstyp mit dem Hauptmaximum des Niederschlages im Win-

ter und einem breiten Nebenmaximum in den Sommermonaten (Abb. 2-2). Die jährliche mittlere Niederschlagshöhe im Messzeitraum zwischen 1891 und 1955 liegt bei 1189 mm/a. Sommerregentypen befinden sich zumeist in den Niederungen. Sie weisen ein stark ausgeprägtes Sommermaximum und eine relativ große Amplitude auf. Im Übergangsbereich zwischen den Mittelgebirgstypen und den Sommerregentypen, in einer Höhenlage zwischen 300 und 600 m ü. NN, treten

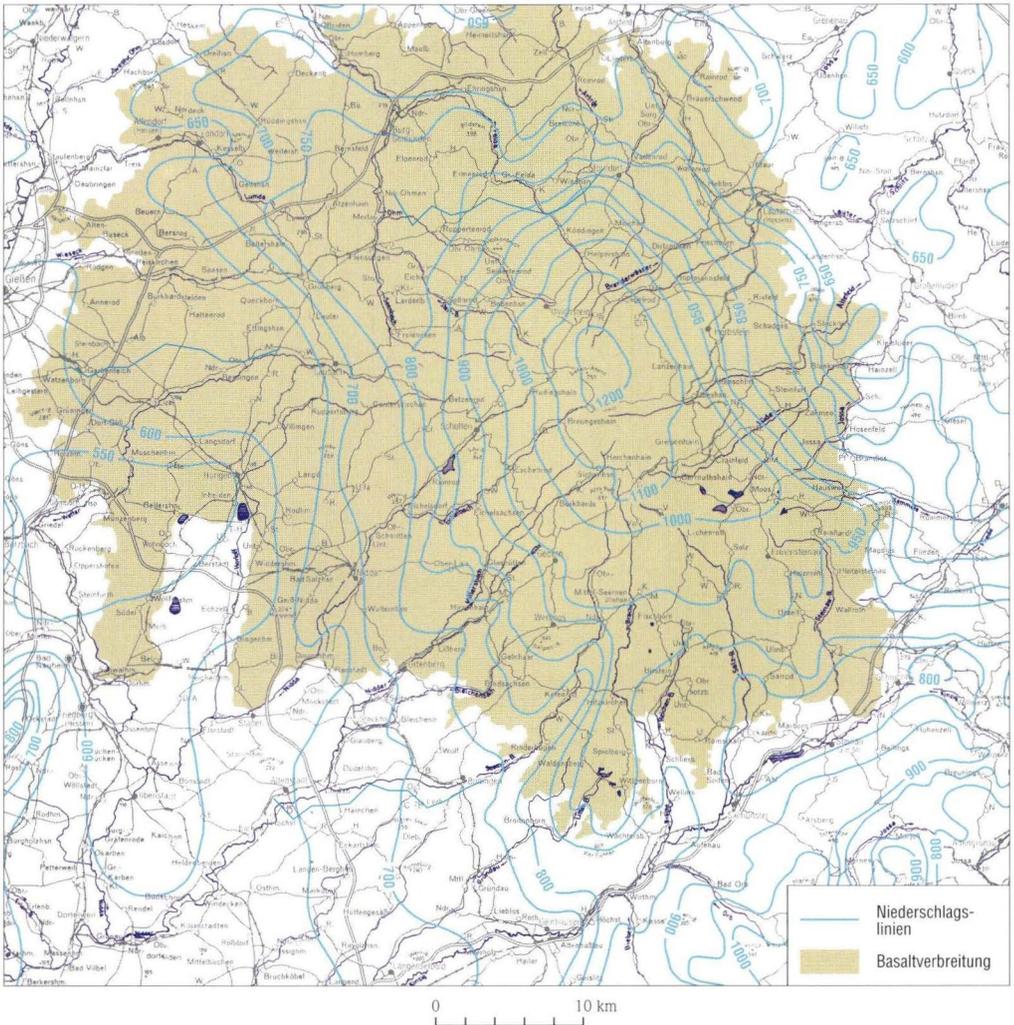


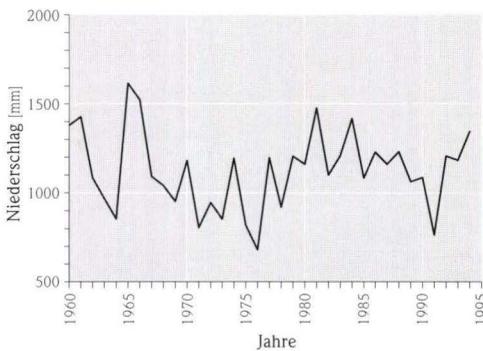
Abb. 2-3. Mittlere jährliche Niederschlagshöhe in [mm], Periode 1891–1955, aus Klima von Hessen (1981–1985).

Mischtypen auf, die einen ausgeglichenen Jahresgang aufweisen.

Der März ist der niederschlagsärmste Monat im Vogelsberg für den Zeitraum von 1931 bis 1960 (z. B. Abb. 2-2, Station Herchenhain: < 70 mm). Der Grund hierfür ist eine im Frühjahr oft vorherrschende antizyklonale Ost- bis Nordostwetterlage, die kalte und trockene Luftmassen nach Mitteleuropa führt (Gerstengrabe et al. 1993).

Die Niederschlagsamplitude im Hohen Vogelsberg reicht von über 1600 mm/a bis knapp unter 700 mm/a. Bei der Niederschlagsstation Ulrichstein (567 m ü. NN) wurden die Jahre 1961 (1430 mm/a), 1965 (1620 mm/a), 1966 (1520 mm/a) und 1981 (1480 mm/a) als die niederschlagsreichsten aufgezeichnet (Abb. 2-4). Das mit Abstand trockenste Jahr war 1976 mit 680 mm/a, gefolgt von 1991 mit 770 mm/a Niederschlag.

Der mittlere Anteil der Schneemenge am Gesamtniederschlag liegt im südwestlichen Untersuchungsgebiet unter 10%. Im NW steigt der Anteil



**Abb. 2-4.** Jahresniederschlag, Station Ulrichstein (567 m ü. NN), Meßzeitraum: 1960–1994.

auf über 10% an und erreicht im Oberwald mit über 20% ein Maximum. Die Liegedauer des Schnees hängt im Wesentlichen von der Lufttemperatur und damit indirekt von der Höhe ab. Die mittlere Anzahl der Frosttage liegt für die Periode von 1891 bis 1930 zwischen 80 Tagen im SW und über 140 Tagen im Oberwald. Exposition, Hangneigung und Bodentemperatur sind dagegen bei der Erhaltung des Schnees von untergeordneter Bedeutung. Für den kurzen Beobachtungszeitraum zwischen den Wintern 1935/36 und 1944/45 zeigt sich im Arbeitsgebiet, dass im Mittel mit zunehmender Höhe zwischen 30 und 110 Tage im Jahr eine geschlossene Schneedecke lag (Klima von Hessen 1981–1985).

Die mittlere Jahresdurchschnittstemperatur (1891–1955) liegt im Arbeitsgebiet zwischen 9 °C in den geschützten Tallagen (im SW: Horloff, Nidda, Nidder; im Süden: Bracht, Kinzig) und knapp unter 6 °C im Hohen Vogelsberg. Die monatlichen Mittelwerte schwanken im Hohen Vogelsberg im Jahresverlauf von weniger als 3 °C im Januar bis zu mehr als 13 °C im Juli.

Der Trockenheitsindex verbindet Niederschlags- und Temperaturverhältnisse in einer Kenngröße. Je kleiner der berechnete Wert, desto trockener ist das Klima. Deutlich tritt wiederum der Unterschied zwischen der trockenen und warmen Wetterau (< 30) und dem nassen und kalten Vogelsberg (> 80) hervor. Der Vogelsberg nimmt mit seinem Höchstwert von > 80 einen Platz im oberen Mittelfeld aller Regionen Hessens ein. Den höchsten Index erreichen die Kuppen des Rothaargebirges mit > 100, der niedrigste Wert befindet sich in der Oberrheinebene mit < 25 (Höltling 1996).

### 3. Geologische Übersicht

#### 3.1 Historischer Abriss über die Diskussion zur Tektonik im Gebiet des Vogelsberges

Anfang des Jahrhunderts begann durch Schottler (1913 bis 1931a) eine intensive geologische Erforschung des Vogelsberges. Er kartierte und erläuterte

te die Blätter 5318 Allendorf (Veröffentlichungsjahr: 1913), 5419 Laubach (1918), 5519 Hungen (1921), 5520 Nidda (1924), 5420 Schotten

(1924), 5422 Herbstein (1928) und 5421 Ulrichstein (1931a). Seine Arbeiten basieren zum Teil auf älteren Kartierungen, so z.B. von Dieffenbach (1856) und Tasche (1859). Schottler fasste seine Geländeerfahrungen und Beobachtungen in vier weiteren Veröffentlichungen (1908, 1931b, 1931c, 1937) zusammen, die sich vor allem mit der Geochemie der Basalte und dem geologischen Aufbau des Vulkangebirges beschäftigen. Östlich des Oberwaldes aufgeschlossene Trachyte, die Schottler zumeist Phonolithe nennt und die er dem Frühstadium des Vulkanismus zuordnet, sowie die ebenfalls östlich des Oberwaldes bei Bermuthshain aufgeschlossenen Schichten der Trias ließen Schottler zum Verfechter der Theorie einer Horststruktur unter den Basalten werden. Der westliche Vogelsberg soll weiterhin durch mehrere Nord-Südverlaufende Verwerfungen gestört sein, die ebenfalls als ein Indiz für eine Horststruktur gedeutet wurden.

Zur Interpretation einer Horststruktur unter den Basalten des Oberwaldes kommt auch Klüpfel (1930, 1955), der sich u.a. auf den Fund eines verzerrten devonischen *Favosites* in einer Muschelkalkdoline nördlich von Steinau an der Straße beruft. Der Fundort liegt etwa 25 km südöstlich vom zentral im Vogelsberg gelegenen Taufstein. Verkiesselte Muschelkalkgerölle in den oberen Quarzitsanden seines Arbeitsgebietes auf Bl. Amöneburg führt Blanckenhorn (1930) auf die Abtragung einer entsprechenden Hochscholle im südlichen Ohmgebiet, also aus dem Hohen Vogelsberg, zurück.

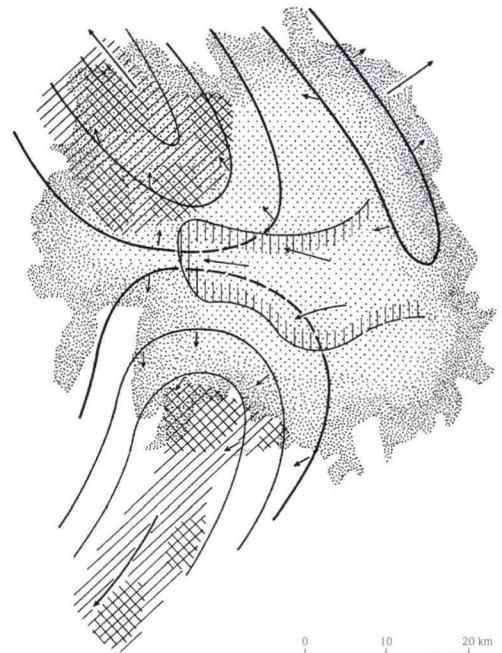
Hummel (1929) begründet die Theorie einer vor- oder frühbasaltischen „schüsselförmigen“ Einsenkung im Bereich des Vogelsberges. Entlang einer Oberwaldachse sieht er ein Hebungsbereich.

Brinkmann (1968) führte umfangreiche rheologische Gefügeuntersuchungen an den vulkanischen Gesteinen des Vogelsberges durch, die er statistisch auswertete. Er stellt fest, dass die Lavaströme aus Spalten des zentralen Vogelsberges vorzugsweise in Richtung NW, SW und NE flossen (Abb. 3-1). Die heutige „rundliche“ Form des Gebirges führt Brinkmann auf den Zusammensturz einer Magmenkammer und einer daraus resultierenden Caldera zurück. Die außerhalb dieser Ein-

senkungszone liegenden Basalte seien erodiert worden. Er greift somit auf die Vorstellung einer „Vogelsberg-Schüssel“ von Hummel zurück und modifiziert diese als nicht vor- oder frühbasaltisch, sondern als spät- bis postbasaltisch.

Schenk (1964, 1968, 1974) geht ebenfalls von einer triassischen Hochscholle im Bereich des Oberwaldes aus. Eine calderaartige Einsenkung hält er ebenso wie Brinkmann (1968) für wahrscheinlich. Schenk (1968) bringt die westliche Randverwerfung des Oberwald-Horstes mit dem Ostrand des Oberrheingraben in Verbindung und stellt somit einen Zusammenhang zwischen der Öffnung des Rheingraben und dem Vogelsberg-Vulkanismus her.

Höltling & Stengel-Rutkowski (1964) vermuten, aufbauend auf einer Arbeit von Gramann (1960), dass direkt vor der Eruption der Basalte eine Aufwölbung im Gebiet des heutigen Vogelsberges vorhanden gewesen sei. Sie schließen dies u.a. aus einem Vorkommen von Muschelkalkgeröllen und Keuperquarzen in den Schichten der Jüngeren Sand- und Tonserie (Tertiär), das aus südöst-



**Abb. 3-1.** Schwellen, Becken und Hauptfließrichtungen der Basalte im Vogelsberg-Gebiet nach Brinkmann (1968).

licher Richtung in das Amöneburger Becken transportiert wurde. Um das Eruptionszentrum des Vogelsberges sehen Hölting & Stengel-Rutkowski einen antithetischen Senkengürtel (z.B. Ebsdorfer Grund), der durch das Einbrechen von „abgewandertem“ und schließlich gefördertem Vogelsberg-Magma entstanden sein soll. Dies stellen beide in einen ähnlichen Wirkungszusammenhang wie das allgemein bei Salzauslaugungssenken der Fall ist. Ferner sehen sie die hierbei beschriebenen Zusammenhänge bei allen „aktiven“ Vulkangebieten.

Bereits 1926 erklärte Köbrich aufgrund von Ergebnissen der Bohrung Bermuthshain II, die Trachyt erbohrt hatte, die triassischen Schichten bei Bermuthshain als eine von einem in die tieferen Schichten intrudierten Trachyt angehobene Scholle. Die Bohrung (Zimmermann 1910) gehört zu einer Reihe von Bohrungen, die zwischen 1905 und 1907 in Oberhessen zur Prospektion von Salzvorkommen abgeteuft wurden.

Wiegand (1977) beschreibt ein hauptsächlich an tangential streichenden Störungen erfolgtes stufenförmiges Absinken der Basaltbasis vom Rand des Vogelsberges zu seinem Zentrum hin. Eine gleichmäßige Ausbildung dieser Senkungsstruktur sei durch Hochschollen gestört. Er weicht hiermit völlig von der Theorie einer Horststruktur unter dem zentralen Vogelsberg ab. Das Beckentiefste und damit die größten Basaltmächtigkeiten liegen nach Wiegand unter dem zentralen Vogelsberg.

Diese Hypothese entwickelt Ehrenberg (1981) weiter. Er geht dabei jedoch nicht von einer tangentialen, allseitigen Absenkung der Basaltbasis zum Hohen Vogelsberg hin aus, sondern sieht einen breiten,  $\pm$  erzgebirgisch verlaufenden Tiefschollenbereich vom Rand zum Zentrum des Vogelsberges hin. Die Resultate der Forschungsbohrungen Hasselborn und Flösser-Schneise (Ehrenberg et. al. 1981b) zeigen weiterhin, dass nicht nur die Annahme einer Horststruktur falsch ist, sondern auch die Meinung, dass die Trachyte nur zu Beginn des Vulkanismus im Vogelsberg gebildet wurden. Beide Bohrungen durchteuften mehrfach unterschiedliche trachytische Laven und Vulkaniklastika inmitten der basaltischen Vulkanitserien des Vogelsberges.

Ehrenberg & Hickethier (1985) werteten Bohr- und Kartierergebnisse aus dem gesamten Vogelsberg auf die Basaltbasis und deren Darstellung in Niveauschollen hin aus. Das Ergebnis lässt einen deutlich gegliederten erzgebirgisch und eggisch bis herzynisch verlaufenden Schollenbau erkennen (Abb. 3-2, 3-3). Rheinische Elemente sind nur am Westrand des Vulkangebirges sichtbar. Die Struktur des Vogelsberges sei von den seit Ende des Paläozoikums phasenweise immer wieder aktiven Hebungen der Kellerwald-Schwelle, der Büdinger Schwelle und randlich von der Spessart-Schwelle mitbestimmt worden. Andere im Tertiär noch aktive Schwellen und Senken, wie die Hunsrück-Oberharz-Schwelle, der Hessische (Rotliegend) Trog und die Frankenberg-Schlüchterner Senke, zeigen jedoch nach Ehrenberg & Hickethier ebenso keine Beeinflussung auf das Strukturbild der Basaltbasis des Vogelsberges wie die Fortsetzung des Oberrheingrabens. Die tiefste Niveauscholle des Basaltes befindet sich nach ihren Ausführungen in einem erzgebirgisch verlaufenden Bereich zwischen Nidda und Wetter, der als Hungen-Schotten-Tiefscholle bezeichnet wird.

Dreher (1996) führte in einem ca. 48 km<sup>2</sup> großen Gebiet westlich von Laubach Bodenmessungen des erdmagnetischen Totalfeldes durch. Seine statistischen Auswertungen, verknüpft mit Foto- und Satellitenbild-Analysen, zeigen, dass eine NE-SW-Richtung (55–75°, Maximum bei 60°) dominiert. Weiterhin treten ein NW-SE-System (110–150°), eine NNW-SSE-Komponente (165°), eine Ost-West-Komponente und eine NNE-SSW-Komponente (25–30°) auf. Dreher unterscheidet in seinem Arbeitsgebiet ferner ein südliches und ein nördliches Bruchsystem. In der südlichen Hälfte herrschen NW-SW streichende Bruchstrukturen vor, die die von Ehrenberg & Hickethier (1985) angenommene Hungen-Schotten-Tiefscholle bestätigen. Es handele sich jedoch nicht um einen einheitlichen Block, sondern um mehrere unterschiedliche Parallelschollen. In der nördlichen Hälfte seines Arbeitsgebietes ändern sich nach Dreher (1996) die tektonischen Verhältnisse. In diesem Bereich befinden sich nach seinen Ausführungen NNE-SSW bis NE-SW (15–40°) verlaufende Schollen, die durch NW-SE

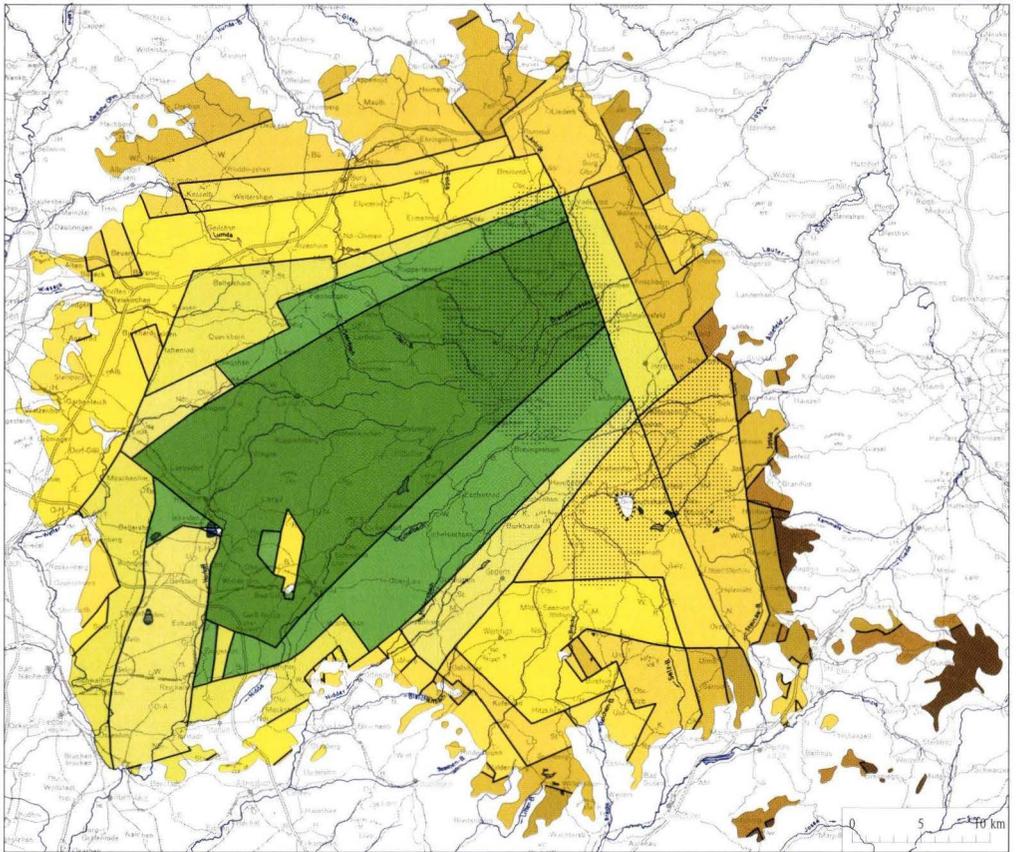


Abb. 3-2. Die Basaltbasis des Vogelsberges nach Ehrenberg & Hickethier (1985).

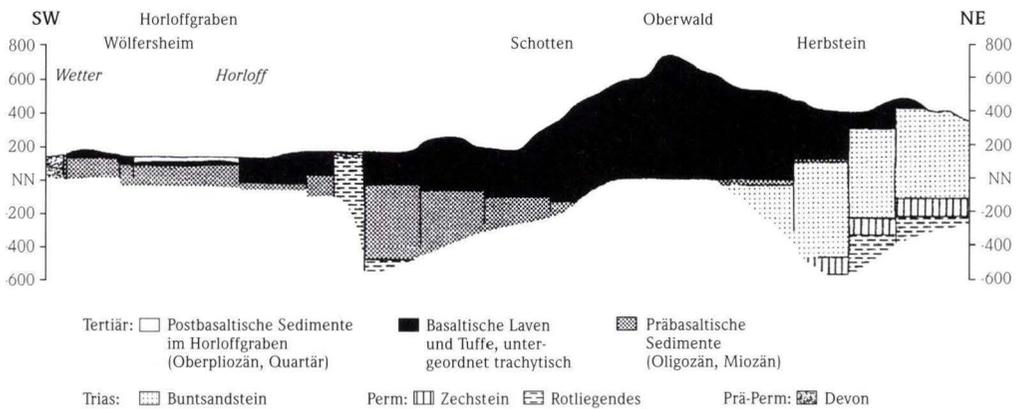
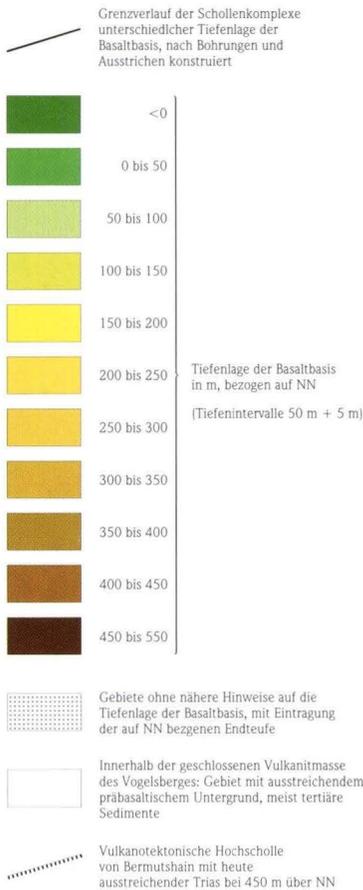


Abb. 3-3. SW-NE-Schnitt durch den Vogelsberg aus Dreher (1996, nach Ehrenberg & Hickethier 1985).



Legende zu Abb. 3-2.

### 3.2 Prävulkanische Abfolge

Die den vulkanischen Vogelsberg unterlagernden Schichten sind zumeist im Randbereich des Vulkangebirges aufgeschlossen. Bereits Schottler (1937) beschreibt paläozoische Gesteine wie devonische Kalke, Sandsteine und Schiefer in der Gegend von Gießen, die Grauwacken von Ruhlkirchen aus dem Unter-Karbon sowie die mesozoischen Schichten des Rotliegenden und Zechsteins am Nordwestrand des Vogelsberges.

Innerhalb des vulkanischen Vogelsberges sind nur an wenigen Stellen prävulkanische Schichten aufgeschlossen. Eine davon ist die durch einen trachytischen Lavadom hochgeschleppte triassische Scholle von Bermuthshain (Tasche 1859, Köbrich 1926, Schottler 1937, Ehrenberg & Hickether 1985). Die Scholle besteht aus Gesteinen des Unteren Muschelkalks (nordöstlich von Bermuthshain) und des Mittleren Buntsandsteins (südöstlich

gerichtete Kluff- oder Verwerfungszone voneinander abgegrenzt werden. Dreher (1996) schließt daraus, dass sich die überregionalen Hauptbruchsysteme Mitteleuropas vom paläozoischen Grundgebirge bis in die überlagernden permischen, mesozoischen und tertiären Deckgebirge fortsetzen. Das variszische Bruchmuster sei während der alpidischen Orogenese reaktiviert und entsprechende Schwächezone bei der Magmenförderung genutzt worden.

von Bermuthshain). Eine zweite Stelle mit prävulkanischen Schichten ist der rheinisch ausgerichtete Horst von Rabertshausen, in dem Rotliegend-Gesteine anstehen. Er liegt zwischen den Orten Bad Salzhausen und Rabertshausen im südwestlichen Vogelsberg. Eine Höhendifferenz von ca. 640 m zur Höhenlage der Rotliegend-Oberkante unter dem Vogelsberg lässt sich nach Ehrenberg & Hickethier (1985) nur durch ein phasenweise relatives Absinken der Umgebung (ca. 400 m) und einem intra- bis postbasaltischem Anheben des Horstes (ca. 200 m) erklären. Ein unterlagernder Trachytdom, wie bei der Trias-Scholle von Bermuthshain, der die permische Scholle angehoben haben könnte, sei jedoch ebenfalls nicht auszuschließen.

In der NE-Ecke des Horloffgrabens überlagern oberpliozäne Sedimente direkt präbasaltisches Sediment, das dem Aquitan zugeordnet wird. Dies wird durch eine voroberpliozäne Hebung des Gebietes mit einer vollständigen Erosion der Vulkanite und einer Umkehrung dieser Bewegung, also einer Absenkung, ab dem Oberpliozän erklärt (Ehrenberg & Hickethier 1985). Schenk (1957) und Boenigk et al. (1977) beschreiben die teilweise mächtigen oberpliozänen und quartären Sedimentlagen im Bereich des Horloffgrabens.

Am SE-Rand der Basaltverbreitung sind in der Gegend von Schlüchtern der Untere Muschelkalk und der Obere Buntsandstein aufgeschlossen. Nach Süden schließen sich zwischen Wächtersbach und Ortenberg der Mittlere und Untere Buntsandstein an. Die permischen Schichten des Rotliegenden und Zechsteins stehen im Bereich des unteren Seemen-Baches und der mittleren Nidder an. Im Westen des Vogelsberges kommen devonische Tonschiefer, Grauwacken und Porphyroidschiefer der Unterems-Stufe neben vereinzel-

ten oberdevonischen Riffkalken vor. Westlich von Gießen sind gefaltete karbonische Kulmgrauwacken und Kulmtonschiefer aufgeschlossen, die zum Rheinischen Schiefergebirge gehören. Nach Norden stehen oligozäne Sedimente, wie die limnischen Ablagerungen der Melanientone und des Rupel-Tones, mit einer teilweise reichen Fauna von z.B. Foraminiferen und Ostracoden an. Zwischen den Tonen und Sanden lagern vereinzelt Braunkohleflöze. Im Norden folgen weiterhin Schichten des Zechsteins und des Buntsandsteins. Im Bereich des Lauterbacher Grabens bei Angersbach finden sich jurassische Sedimente, die aus dunklen karbonatreichen Tonen und bituminösen Kalken bestehen. Sie wurden von Schottler (1937), Krüger (1974) und Weyl (1980) beschrieben. Der Mittlere Buntsandstein dominiert am Ostrand des Vogelsberges; nur vereinzelt wird er durch Unteren Muschelkalk sowie durch Unteren oder Mittleren Keuper unterbrochen. Fast im gesamten Randbereich des Vogelsberges sind die jungtertiären Vulkanite unterlagernden miozänen Sedimente aufgeschlossen. Dies sind zumeist Sande, Tone und vereinzelt Kalksteine.

Einen Überblick über die Bohrungen, die die Basaltbasis unter dem Vogelsberg angetroffen haben, bietet die Arbeit von Ehrenberg & Hickethier (1985). Die bisher tiefste nachgewiesene Basaltbasis wurde in den Jahren 1962/63 durch die Bohrung Rainrod I (Ernst et al. 1970, Kreuzer et al. 1974, Ernst 1977) mit 98 m unter NN festgestellt.

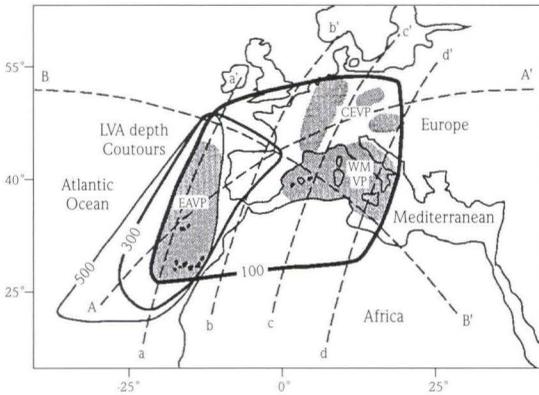
Die im Jahre 1996 abgeteufte Forschungsbohrung Ulrichstein (Kap. 6.4.2.1), die ihren Bohransatzpunkt im Hohen Vogelsberg bei ca. 669 m ü. NN hat, erreichte mit einer Endteufe von 656,5 m u. GOK (12,5 m ü. NN) die Basaltbasis nicht.

### **3.3 Vulkanische Abfolge**

#### **Der europäische Vulkanismus**

Hoernle et al. (1995) deuten seismische Messungen und isotopengeochemische Untersuchungen an känozoischen Vulkangesteinen als Hinweis für die Existenz eines großen, flächigen Upwellings im Oberen Erdmantel unter Europa. Das Upwelling

soll sich vom östlichen Atlantik über Zentraleuropa bis zum westlichen Mittelmeer erstrecken. Die ostatlantische (EAVP) und die zentraleuropäische Vulkanprovinz (CEVP) werden mit der Vulkanprovinz des westlichen Mittelmeeres (WMVP) in Zusammenhang gebracht. Der Bereich des Upwel-



**Abb. 3-4.** Map view showing the extent of the low (less than the global mean) S-wave velocity anomaly (LVA) at depths of 100, 300 and 500 km. Where the LVA intersects the base of the lithosphere, it covers an area of 2,500 x 4,000 km, extending from the Eastern Atlantic volcanic province (EAVP) to northern Africa, the Western Mediterranean volcanic province (WMVP) and the central European volcanic province (CEVP). The LVA becomes narrower at depth, as is indicated by the 300- and 500-km depth contours, and dips to the WNW. Volcanic provinces are denoted by shading (Hoernle et al. 1995).

lings ähnelt einer geneigten Fläche mit einer Ausdehnung von annähernd 2500 km x 4000 km (Abb. 3-4).

Für den Vogelsberg und die anderen känozoischen Vulkanzentren in Zentraleuropa heißt dies, dass ihre primäre Magmaquelle in einem gemeinsamen, großflächigen Bereich von Upwelling im Oberen Mantel zu sehen ist. Der stationäre Plume liegt zum größten Teil unter kontinentaler Kruste, was zu einem Wärmestauereffekt führt. Die thermische Energie wird u.a. vom Zentrum der kontinentalen Kruste über eine Fließbewegung des Mantelmaterials zu den Rändern abgeführt. Eine Ausdünnung der Lithosphäre bis zum Entstehen eines intrakontinentalen Riftsystems ist die Folge.

Nach Wedepohl et al. (1994) verläuft in Zentraleuropa ein 200 bis 300 km breiter Gürtel von bis auf 50 km Dicke ausgedünnter Lithosphäre vom nördlichen Rhone-Graben über Ostfrankreich, Westdeutschland, Belgien und die Niederlande bis zur Nordsee. Liegt ozeanische Kruste über einem Mantel-Upwelling, kommt es neben subaquatischen Eruptivbereichen vereinzelt zu Sea-Floor-Spreading. Beispiel hierfür sind im Mittelmeer der Sardinien/Korsika-Rücken und der Balearen-Rücken. Hoernle et al. (1995) fanden heraus, dass die langsamsten seismischen Geschwindigkeiten und das heißeste Mantelmaterial des o.g. Plumes unter dem Golf von Valencia und dem nördlichen Balearen-Becken liegen.

Die Kollision der afrikanischen mit der eurasischen Platte über der Upwelling-Zone führte wahrscheinlich durch die Verdickung der Kruste im Be-

reich des alpinen Orogens bis auf 130 km zu einem veränderten lateralen Wärmefluss und zu einem veränderten Stressfeld in den Gesteinsformationen. Eine solche tektonische Beanspruchung der Lithosphäre ist ein Grund für das Aufdringen von Magma an die Erdoberfläche (Shaw 1980). Alte und bestehende Schwächezonen werden reaktiviert bzw. verstärkt. An den Schwächezonen steigt duktiler Mantelmaterial in Bereiche niedrigeren Drucks auf. Dieser Vorgang führt zu Dekompressionsschmelzen (White & McKenzie 1989). Ist der Mantel dabei geringfügig heißer als normal, kommt es zu einem starken Vulkanismus, wie er sich in den drei verschiedenen europäischen Vulkanprovinzen (Hoernle et al. 1995) und damit auch im Vogelsberg widerspiegelt.

Illies et al. (1981) sehen ebenfalls eine subkrustale Aufwölbung und erklären das daraus resultierende Rifting durch einen erhöhten Wärmefluss im Mantel unter Zentraleuropa. Nach Wedepohl et al. (1994) entstand der zentraleuropäische Alkalibalsaltvulkanismus durch die Dekompression eines metasomatisch veränderten, aufgewölbten asthenosphärischen Mantels. Dieser Vorgang steht im Zusammenhang mit der alpinen Orogenese (Illies et al. 1981, Neugebauer 1981, Wedepohl et al. 1994).

Im südlichen Oberrheingraben erklärt Prodehl (1981) eine positive thermische Anomalie und das Stressfeld der Gesteine mit der weiterhin anhaltenden Öffnung des zentraleuropäischen Riftsystems, welches in NNE-Richtung vom westlichen Mittelmeer über den Oberrheingraben bis nach

Nordwestdeutschland verläuft. Die Hauptaktivität der Grabenöffnung begann am Ende des Oligozäns; der Vorgang dauert weiter an (Meyer et al. 1983).

Die Richtung des Stressfeldes ist bei der Frage nach den für den känozoischen Vulkanismus entscheidenden tektonischen Strukturen von Bedeutung. Im Bereich des Oberrheingrabens treten posttriassische Blattverschiebungen (NNE–SSW) und Abschiebungen (NW–SE) auf (Murawski 1990). Diese tektonischen Elemente sind die Folge zweier unterschiedlicher, aufeinander folgender Stressfelder (Ahorner 1975, Greiner 1974, Illies 1974, Wunderlich 1974). Beim Beginn der Öffnung des zentraleuropäischen Riftsystems lag die Hauptdruckkomponente etwa parallel zu den Grabenrändern (NNE–SSW). Vom Unter-Oligozän bis zum Pleistozän richtete sich das Stressfeld in Richtung SE–NW aus. Erdbeben-Herdanalysen stützen die Ansicht unterschiedlicher Hauptdruck-Komponenten und ihrer Drehung (Ahorner & Schneider 1974, Ahorner 1983). Neugebauer & Tobias (1977) werteten die Daten eines Erdbebens bei Echzell in der Wetterau aus, das am 4. November 1975 stattfand. Sie fanden das Zentrum des Bebens im Bereich einer NNW streichenden sinistralen Scherfläche.

### **Der Vogelsberg im Rahmen des zentraleuropäischen Vulkanismus**

Der Vogelsberg gehört zum känozoischen Vulkanismus in Zentraleuropa und damit zur zentraleuropäischen Vulkanprovinz (CEVP, Abb. 3-4), welche in Deutschland neben dem Vogelsberg die Gebiete der Eifel, des Hegau, der Heldburg, der Hessischen Senke, des Kaiserstuhls, der Rhön, des Siebengebirges und des Westerwaldes beinhaltet. Zur CEVP gehören weiterhin der Cantal und Mt. Dore des Französischen Zentralmassivs sowie die obere Silesia in Polen und das westliche pannonische Becken in Tschechien und Ungarn. Lippolt (1980) sieht einen ca. 700 km langen Gürtel von Vulkangebieten, der von der Eifel bis nach Schlesien annähernd parallel zum alpinen Orogen in west–östlicher Richtung verläuft.

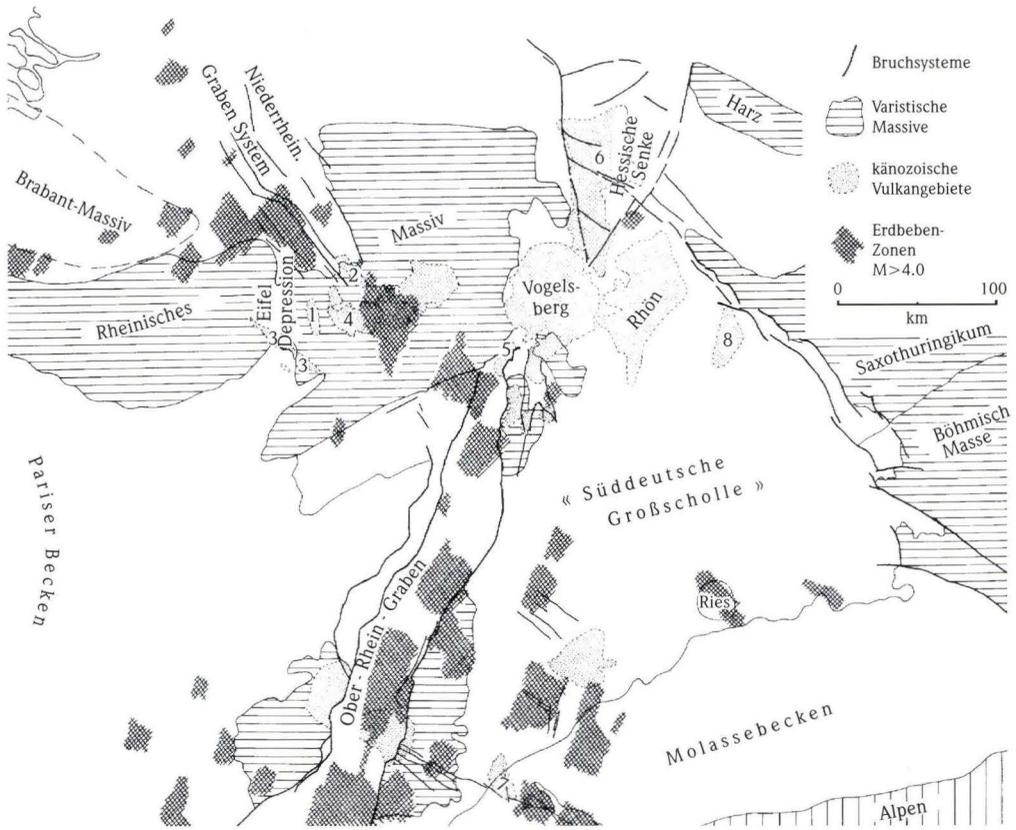
Der zentraleuropäische Vulkanismus (Abb. 3-5) steht in Zusammenhang mit einer durch die Kollision der afrikanischen und der eurasischen Platte

ausgelösten Massenverlagerung im Oberen Mantel, die zu einer Lithosphären- und Asthenosphärenaufwölbung und damit zu veränderten Druckspannungsfeldern in Zentraleuropa geführt hat (Illies 1974, Neugebauer 1981, Schmincke 1982). Nach Wedepohl et al. (1994) liegen die vulkanischen Zentren von Hegau, Vogelsberg, Rhön und Hessischer Senke in der Nähe der östlichen Schulter des aktuellen Doms aus Asthenosphärenmaterial. Die Dicke der Lithosphäre beträgt hier zwischen 50 und 70 km. Beim Rhone-Graben, Bresse-Graben und dem südlichen oberen Rheingraben steigt die Aufwölbung der Asthenosphäre auf 24 bis 25 km an. Der Vogelsberg liegt in der nördlichen Fortsetzung des Oberrheingrabens im Gebiet der südlichen Hessischen Senke.

Vom Oberen Oligozän bis zum Mittleren Miozän vollzog sich eine der Hauptphasen der alpidischen Orogenese. Die adriatische Platte verschob sich dextral entlang der Insubrischen Linie bei einer weiterhin anhaltenden Nordbewegung. Für die Gesteine in Zentraleuropa war dies eine Phase starker Spannungen. Der Vorgang verläuft nahezu zeitgleich mit der Hauptmagmenförderung im Vogelsberg. Für die damalige Vogelsberg-Region ist die Auffaltung der Alpen und das Einbrechen des Oberrheingrabens mit einer Reaktivierung alter bzw. eine Verstärkung bestehender krustaler Schwächezonen verbunden.

### **Zeitraum der vulkanischen Aktivität in der Vogelsberg-Region**

Bei einer 1968 im Bereich des Wasserwerkes Nidda-Orbes abgeteufte, 190 m tiefen Bohrung (Archiv-Nr. 5619/342 des Hessischen Landesamtes für Bodenforschung, HLfB), die später als Doppel-Grundwassermessstelle 98a/b von der Oberhessischen Versorgungsbetriebe AG (OVAG) ausgebaut wurde, datierte v.d. Brellie (in Ehrenberg 1981) 34,5 m unterhalb der tiefsten basaltischen Lava eine dünne lignitische Kohlelage aus 172,40 m u. GOK (44,43 m unter NN) bis 172,45 m u. GOK (44,48 m unter NN) sporenstratigraphisch in das Untere Miozän (Aquitän). Die vermutlich ältesten bekannten Anzeichen von Vulkanismus im Untersuchungsgebiet liegen 6,4 m (38,0 m unter NN) oberhalb der aquitanen Braunkohle. In einer kiesi-



**Abb. 3-5.** Übersichtskarte des mittleren und südlichen Mitteleuropas mit Groß-Bruchsystemen, känozoischen Vulkangebieten und Erdbeben-Zonen, nach Murawski (1990).

1: Hocheifel, 2: Vorderer-Westerwald und Siebengebirge, 3: Westeifel, 4: Osteifel, 5: Südteil der Hessischen Senke, 6: Nordteil der Hessischen Senke, 7: Hegau, 8: Heldburg (Heldburger Gangschar).

gen Sandlage finden sich u.a. trachytische (?) Kiese mit einem Korndurchmesser bis zu 10 mm (Ehrenberg 1981). Eindeutig Trachyt- und Basaltgerölle (bis zu 70 mm Ø) führt eine Kieslage, die 20,9 m über der Braunkohle liegt. Diese den aquitanen Sedimenten zwischengeschalteten Vulkanitgerölle liefern Hinweise auf ältere Vulkankörper, die eventuell sogar vor dem Aquitan liegen. Nach diesen Überlegungen hat die vulkanische Förderung unter Zugrundelegen radiometrischer Zeitskalen (z.B. Harland et al. 1990) bereits vor 25 bis 23 Mio. Jahren, d.h. schon im obersten Alttertiär (Chattien) begonnen. Sedimente, die unmittelbar unter den ältesten Basalten bzw. den untersten Lagen basalti-

scher Gesteine zwischengeschaltet sind, ergaben sporenstratigraphisch bisher nur untermiozäne Alterseinstufungen, die vom Aquitan bis zum Burdigal reichen (Ehrenberg et al. 1981a, Ehrenberg & Hickethier 1985).

Kalium-Argon-Gesamtgesteinsalter an Vulkaniten ergeben eine Zeitspanne vulkanischer Aktivität zwischen 19 und 13 Mio. Jahren sowie nochmals vereinzelt bei ca. 10 Mio. Jahren. Das Maximum der vulkanischen Aktivität liegt dabei zwischen ca. 17 und 15 Mio. Jahren (Lippolt et al. 1973, Lippolt 1983, Kreuzer et al. 1974, Harre et al. 1975, Ehrenberg 1977, Ehrenberg et al. 1981a, Ehrenberg & Hickethier 1985, Fuhrmann & Lippolt 1987).

Nur vereinzelt werden jüngere Alter von 15 bis 12 Mio. Jahren genannt (Kreuzer et al. 1974, Harre et al. 1975, Lippolt 1980). Das bisher jüngste nachgewiesene vulkanitische Gestein, ein intrusiver basanitischer Alkaliolivinbasalt, der im ehemaligen Steinbruch Diehl bei Geilshausen auf Bl. 5319 Londorf aufgeschlossen ist, wird mit 11,9 Mio. Jahren (Ulrich 1967) bzw. 9,6 Mio. Jahren (Harre et al. 1975) angegeben. Das entspricht nach Harland et al. (1990) etwa der Wende zwischen Mittel- und Obermiozän.

Die wirbeltierpaläontologischen (Tobien 1963) und sporenstratigraphischen Datierungen (Stegemann 1964) an den jüngsten, den Vulkaniten zwischengeschalteten Sedimenten stehen hierzu im Gegensatz, da die Zeiteinstufungen vom oberen Helvet (oberes Mittelmiozän) bis ins Obermiozän (über das Torton hinaus bis eventuell ins Sarmat) reichen. Aus diesen paläontologischen Datierungen lässt sich ein maximaler Zeitraum der Magmenförderung in der Vogelsberg-Region vom Chattien (?) (Ober-Oligozän, ca. 25 Mio. Jahre) bis mindestens zum Torton (unteres Ober-Miozän, min. ca. 10 Mio. Jahre) von 15 Mio. Jahren ableiten.

### **Basaltische Gesteine und deren Entstehung**

Lokale Basaltvorkommen im größeren Umfeld des Vogelsberges, wie der Maintrapp bei Hanau und Frankfurt, das Alsberger Basaltplateau und der Landrücken, belegen, dass die Basaltverbreitung ehemals eine größere Ausdehnung aufwies als dies bei der heutigen geschlossenen Vulkanitverbreitung des Vogelsberges der Fall ist. Nach Ehrenberg (1986) wird von einem noch heute vorhandenen Gesteinsvolumen von etwa 500 km<sup>3</sup> an vulkanischen Gesteinen ausgegangen.

Bei den extrudierten und intrudierten Laven des Vogelsberges handelt es sich überwiegend um alkaliolivinbasaltische und basanitische Magmentypen, die typisch für einen an Bruchzonen auftretenden Intraplatten-Vulkanismus sind. Weiterhin kommen subalkalische, tholeiitische Laven vor. Unterschiedliche Differentiate alkalibasaltischer Primärschmelzen, wie Hawaiite, Mugearite, Latite, Phonolithe und Trachyte, treten gegenüber wenig veränderten Schmelzen zurück. In der Forschungsbohrung Ulrichstein (Kött et al. 2001, Hoppe & Schulz 1997)

wurde ein 13,40 m mächtiger Composite-Lava-Flow durchteuft, der aus Latit (unten) und Hawaiiit (oben) besteht. Hierbei traten die Schmelzen bereits vor der Eruption miteinander in Kontakt.

Isotopengeochemische Untersuchungen an Vogelsberg-Basalten liegen von Wittenbecher (1992) und von Jung & Masberg (1998) vor. Wittenbecher (1992) analysierte Proben von tholeiitischen und alkaliolivinbasaltischen Laven. Er deutet die Spurenelementverteilungen, Elementverhältnisse und Isotopensignaturen so, dass die Basalte des Vogelsberges von einem an inkompatiblen Spurenelementen und radiogenem Strontium gegenüber (N-type) MORB-Mantel metasomatisch angereicherten, heterogenen Mantel abstammen. Jung & Masberg (1998) sehen die Quelle des basaltischen Magmas an der Basis der Lithosphäre in einer Tiefe zwischen 75 und 90 km.

Basaltische Magmen entstehen durch ein selektives Aufschmelzen von peridotitischem Material im Oberen Mantel (Yoder & Tilley 1962, Green & Ringwood 1967, Ito & Kennedy 1967, Kushiro et al. 1968, Green 1970, Jaques & Green 1980, Takahashi & Kushiro 1983). Zu einem partiellen Aufschmelzen des Oberen Mantels kann es durch Wärmezufuhr und/oder durch Dekompression kommen. Die Zusammensetzung der Schmelze hängt dabei vom Grad der partiellen Aufschmelzung des Mantelgesteins und von der Tiefe der Schmelzentstehung ab. Ein wesentlicher Faktor, besonders für die Menge der geförderten Lava, ist die Temperatur des Mantelbereiches unter der Lithosphäre (White & McKenzie 1989). Bei der Genese eines tholeiitischen Magmas wird von einer Manteltiefe von ca. 70 km und einem sehr geringen H<sub>2</sub>O-Gehalt (0,1%) ausgegangen. Bei alkaliolivin-basaltischen Magmen wird mit einem Entstehungsort in bis zu 150 km Tiefe unter H<sub>2</sub>O-freien Bedingungen oder Anwesenheit von CO<sub>2</sub> gerechnet (u.a. Brey 1976).

Im Gebiet des Vogelsberges kann aufgrund seiner Lage in der nördlichen Verlängerung des Oberrheingrabens und der Menge der geförderten Laven von einer primär durch einen höheren Wärmefluss entstandenen Schmelze ausgegangen werden. Die Schmelze ist spezifisch leichter als der sie umgebende kristalline Obere Mantel und steigt des-

halb an zumeist tektonischen Schwächezonen auf, sammelt sich in Magmenkammern an und/oder steigt unmittelbar bis zur Oberfläche auf. In Magmenkammern kommt es je nach Aufenthaltsdauer (bis zu mehreren 10 000 Jahren) zu mehr oder weniger starken Differentiationsprozessen. Bei Drucküberlastungen durch weiterhin aufdringendes Mantelmaterial oder durch sich verstärkende Schwächezonen in der Lithosphäre kommt es zur Förderung von dann mehr oder weniger differenzierten Magmen. Bei einer stark gestörten Kruste steigen die Schmelzen bevorzugt ohne Zwischen-

station oder mit einem nur sehr kurzen Aufenthalt in Magmenkammern bis an die Erdoberfläche auf. Die Strecke vom Entstehungsort bis an die Erdoberfläche kann in Stunden bis wenigen Tagen ablaufen, was durch mitgerissene größere peridotitische Mantelgesteine belegt ist. Die unterschiedlichen basaltischen Primärschmelzen (Basanite, Alkaliolivinbasalte, Olivintholeiite) leiten sich dabei durch verschiedene Aufschmelzungsgrade von ca. 2 bis 15% (u.a. Wedepohl 1985) vom Mantelmaterial in unterschiedlichen Tiefen ab.

### 3.4 Basaltische Verwitterung und Lagerstätten

Die Jahresdurchschnittstemperatur in Mitteleuropa verringerte sich vom Ober-Oligozän bis zum Ober-Miozän von fast 20°C auf etwa 15°C (Schmidt 1978). Im Zeitraum der Basaltförderung herrschten subtropische bis tropische Klimaverhältnisse in Zentraleuropa. Im Vergleich hierzu liegt die heutige Jahresdurchschnittstemperatur im Untersuchungsgebiet bei rd. 7°C.

Die Paläogeographie Mitteleuropas wird im Oligozän von einer Transgression aus dem Gebiet der heutigen Nordsee geprägt (Schmidt 1978). Die marine Überflutung stellte vermutlich eine Meeresverbindung mit dem östlichen Teil Europas her und stieß über Hessen und damit auch über das spätere Ausbruchgebiet des Vogelsberges in das Oberrheingebiet vor. Hier lagerten sich während des Unteroligozäns Anhydrit, Steinsalz und abbauwürdige Kalisalzflöze ab (Pechelbronner Schichten). Die Oberrhein-Senke verbreitete sich zum Mainzer Becken, in dem die fossilreichen Alzeyer Meeressande, brackische Cyrenenmergel und Süßwasserkalke abgelagert wurden. Im Ober-Oligozän zog sich das Meer in das heutige Nordsee-Becken zurück. Nach der Regression senkte sich der Oberrhein-Graben im Miozän und Pliozän bei verstärkter fluviatiler Sedimentation weiter ab.

Die klimatischen Bedingungen im Tertiär führten zu einem üppigen Bewuchs, der sich in einer Vielzahl von Braunkohleflözen widerspiegelt. Die Vorräte an oligozänen und miozänen Braunkohlen beliefen sich in Mitteleuropa auf etwa 45 Mrd.

Tonnen (Schmidt 1978). Das miozäne Hauptflöz der Niederrheinischen Bucht hat eine Mächtigkeit von rd. 100 m. Die Inkohlung von pflanzlichem Material erfordert weitgehend anaerobe Bedingungen, da unter aeroben Verhältnissen eine vollständige Zersetzung des Materials stattfindet. Eine Ausschaltung des Luftsauerstoffs ist bei Wasserbedeckung der pflanzlichen Substanz in Waldmooren, Mooren und in langsam absinkenden Becken mit oberflächennahem Grundwasserstand gegeben.

Bei den Braunkohlenvorkommen im Vogelsberg handelt es sich zumeist um geringmächtige, langgestreckte Flöze im Liegenden des basaltischen Tertiärs oder um Kohlenbildungen zwischen den einzelnen Eruptivphasen. Solche Vorkommen verteilen sich über den gesamten Vogelsberg. Die größten ehemaligen Braunkohlentagebaue liegen im jungtertiären Senkungsgebiet des Horloffgrabens. Namen wie Unterer und Oberer Knappensee auf Bl. 5519 Hungen weisen auf die Entstehung der heute offenen Wasserflächen hin.

Für die subaerischen Extrusiva des Vogelsberges bedeuteten die oben beschriebenen paläoklimatischen und paläobotanischen Bedingungen während der Hauptförderzeit im Unter- und Mittel-Miozän, dass sie neben einer physikalischen einer intensiven chemischen sowie einer biologischen Verwitterung ausgesetzt waren. Hierdurch bildeten sich Ferralsole (Roterden) und Basalteisensteine.

Die fossilen Ferralsole des Vogelsberges sind ein Produkt der tertiären Bodenbildung. Sie sind inten-

siv und tiefgründig verwitterte Böden der Tropen bis Subtropen. Die Böden desilifizieren bei gleichzeitiger Ferrallitisierung, d.h. es findet eine starke Verarmung an Silizium bei zeitgleicher Anreicherung der stabilen Verwitterungsprodukte Eisen, Aluminiumoxid, Kaolinit und Al-Chlorit statt. Es entsteht ein meist kräftig rot oder gelb gefärbter Bu-Horizont, der in seinem Endstadium kaum noch verwitterbare Silikate enthält. Während der Verwitterung wird die Gesteinsstruktur aufgelockert. Alkali- und Erdalkaliumionen werden gelöst und mobilisiert ( $\text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{K}$ ). Gleichzeitig bildete sich das Fe-Oxid Goethit, teilweise auch Hämatit. Bei der Ferrallitisierung treten Massenverluste bis zu 90% auf, wobei die äußere Form der Minerale über lange Zeiträume erhalten bleiben kann. Bei humiden Klimaverhältnissen, wie sie im tertiären Vogelsberg vorherrschten, sind die tieferen Bodenschichten oft langfristig wassergesättigt. Dies hat zur Folge, dass eine Oxidation des freigesetzten silikatischen Eisens nicht stattfinden kann. Die Eisenlösung wird entweder lateral abgeführt und scheidet sich an Hangkanten aus oder steigt kapillar auf und bildet eine Eisenkruste an der Oberfläche. Ferralsole entstehen über einen sehr langen Zeitraum (Jahrmillionen) und stellen alte Landoberflächen dar. Heute sind sie zumeist reliktsch und unterliegen bei den veränderten Klimabedingungen einer starken Erosion (Scheffer & Schachtschabel 1992).

Die Basalteisensteine (Brauneisenerze) gehören ihrer Genese entsprechend zu den Lateriteisenerzen, die bei tropisch-humiden Verwitterungsvorgängen entstehen. Das Eisen wird aus dem unterlagernden Basalt ausgelaugt. Die Eisenlösung steigt kapillar in die oberen Bereiche des verwitterten Basaltes und konzentriert sich dort. Das Eisen fällt in Form von Goethit (Nadeleisenerz,  $\alpha\text{-FeOOH}$ ) mit einem schalig-kugeligen Habitus aus. Kolloidale Beimengungen im Brauneisenerz zeigen, dass eine Vorstufe der Kristallisation des Goethits in Gelen zu sehen ist (Matthes 1987).

Bei einer Änderung des tropisch-humiden Klimas zu warm-feuchtem, tropisch bis semiaridem Klima mit langen Niederschlagszeiten und anschließenden Trockenzeiten werden Bauxite gebildet. Nach einer Auslaugung während der Regenzeiten folgt ein kapillarer Aufstieg der Lösung bedingt durch die

starke Verdunstung an der Erdoberfläche. Durch eine pH-Wertänderung von schwach sauer zu schwach alkalisch kommt es zur Ausfällung von Al unter Bildung von Al-Hydroxiden (Gibbsit,  $\gamma\text{-Al(OH)}_3$ ) oder Al-Oxidhydraten (Böhmit,  $\gamma\text{-AlOOH}$ , Diaspor,  $\alpha\text{-AlOOH}$ ). Bei den Silikatbauxiten bzw. den Lateritbauxiten, wie sie im Vogelsberg vorkommen, treten neben dem Gibbsit auch amorphe Alumogele ( $\text{Al(OH)}_3$ ) auf. Nebengemengteile sind Kaolinit, Quarz, Hämatit und Goethit. Bauxitknollen sind in Konkretionszonen fossiler silikatbauxitischer Böden zu finden (Matthes 1987).

Höiting & Stengel-Rutkowski (1964) weisen hierbei auf die Bedeutung von hydrothermalen Verwitterungen und Umwandlungen durch kohlen-säurehaltige oder stärker konzentrierte Lösungen im Gefolge des Vulkanismus hin.

Die primären Erzlager des Vogelsberges sind nach Schricke (1986) im Allgemeinen nur einige Meter mächtig und haben im Verhältnis zur Gesamtmasse einen geringen Metallgehalt. In sekundären Erzlagerstätten können die Mächtigkeit des Lagers und die Metallgehalte jedoch zunehmen.

Der Vogelsberg ist eine Erzlagerstättenprovinz, deren Ressourcen bereits seit dem 19. Jahrhundert bis weit in das 20. Jahrhundert abgebaut und wirtschaftlich genutzt wurden. Die meist kleinen, aber zur damaligen Zeit abbauwürdigen Basalteisensteinlagerstätten liegen im nordwestlichen und westlichen Teil des Vogelsberges. Hierbei sind vor allem der Westen des Bl. 5319 Londorf, der SE des Bl. 5219 Amöneburg und der nordwestliche Teil des Bl. 5420 Schotten zu nennen. Die Förderung fand überwiegend in Tagebauen statt, jedoch gab es auch vereinzelte Untertagebaue. Heute sind die Bergwerke erschöpft oder es wird aus wirtschaftlichen Gründen nicht mehr gefördert.

Eine der bedeutendsten Gruben im Vogelsberg war die Grube Albert bei Nieder-Ohmen, die zuletzt der Hessischen Berg- und Hütten-AG, Wetzlar, gehörte. Die Grube stellte am 31.12.1954 ihren Betrieb ein. Zu ihr gehörte die Förderstelle Lichter-Wald, die südwestlich von Bernsfeld lag. Hier befand sich über dem Basalteisensteinlager ein Bauxitlager, das ebenfalls abgebaut wurde. Von 1948 bis 1954 wurden von der Grube Albert 961 297 t Rohbrauneisenstein und 11 296 t Rohbauxit

gefördert. Weitere nennenswerte Brauneisenstein-Bergwerke waren die Tagebaue Ludwigssegen, Otto, Eisen, Eisen Ernestine (alle auf Bl. 5320 Burg-Gemünden), Bornwiese, Friedland-Nord (5319 Londerf) und Rüdtingshausen (5219 Amöneburg). Mit den Abbauen Bornwiese und Friedland-Nord beendeten im Jahre 1967 die letzten Brauneisenstein-Bergwerke ihre Produktion. Die Gewerkschaft Louise, der bis auf die Grube Albert alle genannten Bergwerke gehörten, hatte zwischen den Jahren 1949 bis 1967 eine mittlere Gesamtförderung von 334 744 t/a gebrochenem Brauneisenstein. Rund 15% dieser Menge konnte aufbereitet abgesetzt werden. 1967 wurden nur noch 96 856 t Brauneisenstein gefördert (Schricke 1986).

Im Untersuchungsgebiet befinden sich eine Vielzahl von Steine- und Erden-Lagerstätten, die früher in großer Zahl betrieben wurden. Gestiegene Qualitätsanforderungen und veränderte Preisverhältnisse im Zuge gewandelter technischer Bedingun-

gen von Abbau und Transport haben dazu geführt, dass heute nur noch einige große und damit wirtschaftliche Brüche in Betrieb sind. Die wohl bedeutendsten Basaltbrüche sind der Steinbruch Unter-Widdersheim und der Steinbruch Breitenborn. Bevorzugte Abbauprodukte sind hierbei die körnigen bis feinporigen Gesteine der tholeiitischen bis alkaliolivinbasaltischen Serie, die früher als Pflaster- und Mauersteine sowie als Packlage eingesetzt wurden. Heute wird das Gestein nach dem Abbau gebrochen und findet zumeist als Schotter, Splitt, Füller und Betonzuschlagsstoff Verwendung. Weiterhin wurden und werden neben den Basalten vereinzelt noch folgende Steine und Erden abgebaut: Ton, Lehm, Farberden, Sande, Kiese, Kalksteine, Sandsteine und Quarzite. Die meisten ehemaligen Steinbrüche sind inzwischen verfüllt und einer forstwirtschaftlichen Nutzung zugeführt worden.

## 4. Böden

Die Böden im Vogelsberg werden im Wesentlichen von den pedogenetischen Faktoren Ausgangsgestein, Relief, Klima und Zeit geprägt. Ferner sind biotische Faktoren wie Fauna und Flora sowie in jüngerer Zeit anthropogene Beeinflussungen entscheidend bei der Bildung eines Bodens und dessen weiterer Entwicklung. Die große Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten der bodenbildenden Prozesse führt zur Vielfalt der Bodenformen und ihrer Vergesellschaftung.

Der entscheidende Zeitraum für das Verständnis der heutigen Böden im Vogelsberg ist das Pleistozän mit seinen verschiedenen Glazial- und Interglazialzeiten sowie das vor ca. 11 500 Jahren beginnende und seitdem andauernde holozäne Postglazial.

Über weite Flächen des Arbeitsgebietes wird das anstehende Gestein von teilweise mächtigen Schuttdecken überlagert, die das eigentliche Ausgangssubstrat für die heutigen Böden bilden. Die Schuttdecken sind im Periglazialraum zwischen den nordischen und alpinen Eismassen bis in die

Jüngere Tundrenzeit des Weichsel-Spätglazials durch Kryoklastik, Solimixtion und Solifluktion aus den anstehenden Gesteinen des Arbeitsgebietes und der kryoturbierten Einmischung äolischen Fremdmaterials entstanden. Während der Kaltzeit wurde aus vegetationsarmen Schotterebenen schluffreiches Material (Löss) ausgeweht. Der Löss lagerte sich bei nachlassendem Wind im gesamten Arbeitsgebiet ab. Besonders hohe Mächtigkeiten erreicht er im Lee der Bergrücken (Ostexposition). Das Kalziumcarbonat des Lösses wurde postglazial unter den nun vorherrschenden humiden Klimaverhältnissen gelöst und ausgewaschen. Infolgedessen kam es zur Verbraunung (Fe-Freisetzung aus primären Silikaten), Verlehmung (Residualtonanreicherung) und zur Umwandlung der verwitterten Silikate in sekundäre Tonminerale. Aus dem so entstandenen Lösslehm entwickelten sich u.a. die im Vogelsberg weit verbreiteten Braunerden, Parabraunerden und Pseudogleye (Sabel 1988).

In den Hochlagen des Oberwaldes und auf benachbarten Riedeln dominieren Lockerbrauner-

den, deren basale Schuttlagen aus vulkanischem Material von unterschiedlicher Konsistenz wie Basaltzersatz, Gesteinsschutt oder vulkaniklastischem Material bestehen. In der jüngsten, also obersten Schuttlage wurde neben Löss auch Laacher Bimstuff angereichert. Es handelt sich hierbei um einen trachytischen Aschentuff, der im späten Jungpleistozän (Goti-Glazial/Allerödzeit) aus dem Laacher-See-Gebiet der Eifel mit dem Wind in Hauptrichtung Süd bis Ost transportiert wurde (Plass 1978).

Wegen der selektiven Verwitterung der vulkanischen Gläser besitzen Lockerbraunerden ein Raumgewicht, das unter  $0,85 \text{ g/cm}^3$  liegt. Sie sind extrem sauer und weisen ein stabiles Gefüge auf (Scheffer & Schachtschabel 1992). Durch die geringe Dichte und den hohen Mittelporenanteil haben sie eine sehr hohe Feldkapazität. Die Lockerbraunerden nehmen die erhabenen Reliefbereiche im Vogelsberg ein, während in den Quellmulden des Oberwaldes Grund- und Stauwasser beeinflusste Böden vorkommen. Die Quellaustritte führen in den Hanglagen zu vernässten Flächen, die sich bei sommerlicher Oberbodentrockenheit zu Quellengleyen und bei ganzjähriger Wassersättigung zu Hanggleyen entwickeln. Im Oberwald befinden sich ferner zwischen den Gipfeln des Taufsteins, Sieben Ahorns und Grünbergs Hochmoore, die sich aus Stagnogleyen entwickelt haben. Besonders im Gebiet der Bachoberläufe und in den talbegleitenden Unterhängen treten vergesellschaftet Hangpseudogleye und Pseudogleye auf, die aufgrund ihres verdichteten Unterbodens (Lösslehmreiche Mittellagen) durch eine gehemmte Bodenwasserversickerung charakterisiert und durch den häufigen Wechsel von niederschlagsbedingter Wassersättigung und saisonaler Austrocknung geprägt sind.

Im restlichen vulkanischen Vogelsberg sind auf steileren Hängen und Rücken großflächig meist mittelgründige Braunerden anzutreffen, die überwiegend landwirtschaftlich genutzt werden. In konkaven Reliefbereichen und Plateaus sind stau-nasse Parabraunerden und Pseudogleye verbreitet. In kleineren Tälern und Dellen ohne perennierenden Wasserlauf herrschen mittelmächtige bis mächtige Kolluvien vor, die aus akkumuliertem Bo-

denmaterial bodenerosiver Prozesse hervorgingen. In den tieferen Lagen der Täler leiten sie in Grundwasser beeinflusste Auenablagerungen über. Diese werden talabwärts feinkörniger und nehmen an Mächtigkeit zu. Je nach Vernässungsstufe und Dauer der Vernässung sind die Bodentypen Auenboden und Auengley, stellenweise auch Nass- und Anmoorgley anzutreffen. Für diese Bodentypen ist eine fast ständige Vernässung bis in den Oberboden Voraussetzung. Reliktisch kommen Moorgleye und Niedermoore vor, so z.B. im mittleren Niddatal oberhalb von Eichelsdorf, zwischen Kohden und Unter-Schmitten sowie im Bereich des Hochwasserrückhaltebeckens Ulfa.

Für die exponierten Steillagen des Vogelsberges, an denen die Erosion eine Tieferentwicklung des Bodens verhindert, sind flachgründige Ranker und Regosole typisch. Diese werden fast ausschließlich forstwirtschaftlich, vereinzelt auch durch Weiden genutzt.

Im westlichen Arbeitsgebiet sind in erosionsgeschützter Reliefposition Paläosole und hierbei insbesondere die Ferralsole verbreitet, welche jedoch aufgrund ihres Alters und ihrer Erosionsanfälligkeit überwiegend nur als Teilprofile vorhanden sind (Schrader 1980). Da die tertiären Bodenrelikte das Pleistozän überdauert haben, weisen sie einen mehr oder minder stark überprägten Oberboden nach.

Im südlichen Untersuchungsgebiet, unterhalb der Grenze Basalt/Buntsandstein, überwiegen an den Hängen Braunerden, denen zumeist ein Blockschuttstrom aus vulkanischem Material auflagert. Der tonige Feinboden der Schuttdecken besteht zumeist aus kryoklastisch verwitterten Tonsteinen der Buntsandstein-Formation. Im Hangfußbereich herrschen Parabraunerden vor. Bei geringer Hangneigung haben sich Pseudogleye ausgebildet, die bedingt durch lokale Grundwasseraustritte mit Gleyen vergesellschaftet sind. Besteht keine basaltische Beeinflussung mehr, können sich in den Tonstein-Serien des Buntsandsteins durch Verwitterung Pelosole bilden, die wahrscheinlich durch die periglaziale Kryoklastik der Tonsteine initiiert wurden. Ein anhaltendes Durchfeuchten in der Auftauzone hat durch Quellen der Tonminerale zum Aufweichen und Zerteilen des tonreichen Ge-

steins geführt, so dass ein Kohärentgefüge entstand. Dieses wandelte sich später in das heutige charakteristische Absonderungsgefüge um (Sabel 1988).

Die Sandsteine des Buntsandsteins werden überwiegend von basenarmen, sandigen Braunerden, Rankern oder Regosolen bedeckt, auf denen zu meist Wälder stehen. Sie überlagern entweder direkt den anstehenden Buntsandstein oder eine Buntsandsteinschuttdecke. Hangabwärts schaltet sich oft eine Mittellage aus Lösslehm zwischen, die dem Boden den Profilaufbau einer Parabraunerde gibt. Bei Staunässe kommt es zu Pseudovergleyung. Vereinzelt gibt es bei stark sandigen und konglomeratischen Böden Anzeichen einer schwachen Podsolierung, die ein fortgeschrittenes Versauern belegt. An der Stufenstirn des Büdinger-Waldes kann diese Tendenz bis hin zum Podsol entwickelt sein.

Die Muschelkalkgebiete des Untersuchungsgebietes sind zum überwiegenden Teil mit Lösslehmhaltigem Solifluktionsschutt oder Fließerden bedeckt, auf denen sich je nach Lösslehmanteil tief- bis flachgründige Parabraunerden, Braunerden und Rendzinen ausgebildet haben. Auf Standorten, die stark der Erosion ausgesetzt sind, wie bei steilen Hängen und Bergkuppen, können Mullrendzinen, Protorendzinen und Braunerde-Rendzinen vorkommen (Reichmann 1978, Sabel 1988).

Bei den Böden über Rotliegend im südlichen Untersuchungsgebiet herrschen auf den Schluff-

und Tonsteinvorkommen Pelosole vor, die bei der geringen Wasserleitfähigkeit des Tonbodens oft staunass sind. Eine Löss- oder Lösslehmbedeckung ist meist nur geringmächtig, häufig durch Boden-erosion infolge unsachgemäßer Landnutzung verkürzt oder abgetragen. Bei den Dolomit- bzw. Kalksteinen des Zechsteins kommen überwiegend flachgründige Rendzinen vor, die entweder direkt dem Kalkstein auflagern oder auf einer tonig-lehmigen basalen Solifluktionsdecke liegen.

In den zum Teil breiten Talauen des Untersuchungsgebietes sind Braune Auenböden, in Altläufen Auengleye und vereinzelt Anmoorgleye verbreitet. In den schluffreichen Sedimenten kommt ein meist nur geringer Feinkiesanteil vor. In den engen und steilen Nebentälern wechseln tonige Lehme mit Kies- und Geröllablagerungen. Die Böden in den Tälern sind verbreitet Grundwasser beeinflusst und werden daher als Grünland oder forstlich genutzt. Die flächige Durchführung von Meliorationsmaßnahmen hat eine ackerbauliche Nutzung der Flussniederungen ermöglicht. Diese spiegelt sich in den durchgeführten Dränmaßnahmen wider (Kap. 8.3). Die hierdurch erzielten Grundwasserabsenkungen, vor allem in den Gleyen und Nassgleyen, haben durch eine Strukturlockerung des Bodens zu einem aus landwirtschaftlicher Sicht verbesserten Wasser- und Lufthaushalt und somit zu einer günstigeren und ertragssteigernden Durchwurzelung des Oberbodens geführt.

## 5. Methodik

### 5.1 Vorbereitende Datenrecherchen und erste Geländebegehung

Die für eine hydrogeologische Landesaufnahme relevanten und verfügbaren Daten wurden bereits vor der Kartierung recherchiert und aufbereitet, so dass eine Überprüfung der Daten während der Geländeaufnahme möglich war.

Dies gilt für folgende Punkte:

- Wassergewinnungsanlagen mit einer Zuordnung nach:
  - a) Quellfassungen,
  - b) Flachbrunnen (< 10 m tief),
  - c) Tiefbrunnen (> 10 m tief).

- Grundwassermessstellen,
- Abflusspegel,
- sonstige Abflussmessstellen (z.B. Niedrigwassermessstellen, bei anderen hydrologischen Aufnahmen genutzte Messpunkte),
- potenzielle quantitative und qualitative Beeinflussungen von Gewässern (z.B. Entnahmen oder Einleitungen),
- Quellsignaturen und andere Hinweise auf Grundwasseraustritte in den TK 25 (unterschiedliche Auflagen),

- Auswertung von sekundärem Kartenmaterial (so weit vorhanden):
  - bodenkundliche Karten (Gleye, Moore, ...),
  - forstwirtschaftliche Karten (z.B. Darstellungen der Waldgesellschaften mit einer Einteilung der Standorte nach dem Geländewasserhaushalt),
  - Dränungspläne,
  - Karten und Arbeiten von z.B. Hochschulen und Wasserversorgern,
- Auswertung bereits durchgeführter hydrogeologischer und/oder hydrologischer Kartierungen,
- Auswertung landschaftsökologischer Kartierungen,
- Spezialkarten (z.B. Bergbaukarten).

Im Anschluss an die Recherche zu diesen Punkten wurde eine vorbereitende Geländebegehung durchgeführt. Spezielle Problempunkte wurden vor Ort gezielt geklärt. Ferner wurde der Eindruck, der durch die vorbereitenden Tätigkeiten entstanden war, kritisch überprüft. Daraus resultierte eine erste Zeitvorgabe für die Kartierung.

Bei der Übersichtsbegehung wurde Folgendes berücksichtigt:

- Zufahrtsmöglichkeiten (z.B. Forst, größere Firmengelände, militärische Anlagen),
- Eigentumsverhältnisse (z.B. Privatforste),
- Flächennutzung,
- Begebarkeit an oberirdischen Gewässern,
- geologische und
- hydrologische Situation.

Die recherchierten Daten wurden während der späteren Kartierung von den Kartierern im Gelände überprüft. Vorbereitende Datenrecherchen erleichtern die Arbeit im Gelände, indem eine Hilfestellung geleistet und gleichzeitig eine Sensibilisierung für bestimmte Fragestellungen vorgegeben wird.

### **Hinweise auf Grundwasseraustritte aus TK 25 unterschiedlicher Auflagen**

Die in den amtlichen TK 25 eingezeichneten Quellsignaturen und Nassstellen sind eine wertvolle Hilfestellung für eine hydrogeologische Kartierung. Vor einer Überbewertung dieser Darstellungen, die bis zu einer Beurteilung des Schüttungsverhaltens von Grundwasseraustritten führen kann (Schutzgemeinschaft Vogelsberg 1997), muss je-

doch gewarnt werden. Ein Konzept, dessen Grundlage das einmalige Aufsuchen der in den TK 25 eingetragenen Quellen im Gelände ist und das daraus in Verbindung mit eigenen Beobachtungen Rückschlüsse über das langfristige Schüttungsverhalten der Grundwasseraustritte zieht, ist nicht sinnvoll. Dies gilt ebenfalls für den Vergleich unterschiedlicher Auflagen einer Karte, so z.B. bei Bl. Schotten für die Auflagen der Jahre 1912, 1959, 1974 und 1988.

Der Zeitpunkt der Kartierung eines Grundwasseraustritts ist von entscheidender Bedeutung für seine hydrologische und hydrogeologische Interpretation. Die Frage der Aufnahme zu unterschiedlichen Jahreszeiten stellt sich für jeden Kartierer. Wenn die Erhebungen zu einer Karte in sehr feuchten Jahreszeiten stattfinden, müssen die eingezeichneten Grundwasseraustritte zwangsläufig von den Darstellungen abweichen, deren Aufnahme in trockenen Jahreszeiten vorgenommen wurde. Anschaulich wird das Problem durch die Betrachtung der Quelle 5420-4-802 (Quellkartierung, Schutzgemeinschaft Vogelsberg 1997). In der TK 25 von 1959 ist in dem Gebiet der Quelle ein System von Trockengräben eingezeichnet. In der TK 25 von 1988 ist dort kein Grundwasseraustritt vermerkt. Unterschiedliche Kartierungen zwischen den Jahren 1991 und 1996 zeigen jedoch, dass ein vernässter Bereich vorliegt, der je nach Kartierzeitpunkt über einen unterschiedlich hohen Abfluss verfügt. Bei der Kartierung des HlFB im September 1996 wurde eine Vernässung, jedoch kein Abfluss festgestellt.

Eine Kartierung im Frühjahr nach einem sehr feuchten Winter würde für den Bereich 5420-4-802 in der TK 25 zu einer „Moor, Bruch und Sumpf“-Signatur oder zumindest zu einer „Wiesen und Weiden mit nassen Stellen“-Signatur führen. Eine Kartierung nach einem trockenen Sommer lässt in der Darstellung des Gebietes in der TK 25 keine Rückschlüsse auf Grundwasseraustritte zu. Die Darstellungen von Trockengräben in der Karte von 1959 und das Fehlen von Hinweisen auf Vernässungen in der TK 25 von 1988 lassen den Schluss zu, dass die Kartierungen zu diesen Karten jeweils in trockenen Jahreszeiten durchgeführt wurden.

Dieser Sachverhalt macht deutlich, dass ein Konzept, das über den Vergleich von Quellsignaturen in unterschiedlich alten Karten und eigenen Geländeerhebungen Aussagen zum Schüttungsverhalten bzw. zur Beeinflussung von Grundwasseraustritten durch Eingriffe in die Natur prognostiziert, mit

großen Fehlern belastet ist. Diese Fehler führen zwangsläufig zu Fehlinterpretationen. Um gesicherte Aussagen zu den in den verschiedenen TK 25 eingetragenen Grundwasseraustritten treffen zu können, ist eine mehrjährige kontinuierliche Beobachtung der Standorte notwendig.

## 5.2 Hydrogeologische Kartierung

### 5.2.1 Grundwasseraustrittskartierung

Ein zentraler Aspekt der hydrogeologischen Kartierung im Vogelsberg war die Aufnahme der Grundwasseraustritte. Die Kartierung wurde in einem möglichst kurzen und zusammenhängenden Zeitraum unter gleich bleibenden meteorologischen und hydraulischen Bedingungen durchgeführt.

Diese Voraussetzungen sind in der Regel fast ausschließlich in Spätsommern nach längeren Niederschlagspausen gegeben, da in diesem Zeitraum gewöhnlich kein oberflächiger Abfluss des Niederschlags stattfindet sowie Grundwasseraustritte und Gewässer zum ganz überwiegenden Teil aus dem Grundwasser gespeist werden (grundwasserbürtiger Abfluss). Die zumeist vorherrschenden Trockenperioden führen dazu, dass Niederschläge dann nur selten einen Einfluss auf Quellschüttungen und das Abflussverhalten der Fließgewässer haben. In Spätsommern nimmt die hohe Aufnahmekapazität der trockenen Böden den Niederschlag ganz auf oder puffert ihn zumindest ab.

Bei der hydrogeologischen Kartierung der Vogelsberg-Region wurden jeweils drei Teams, bestehend aus jeweils zwei bis drei Kartierern und einem Fahrer eingesetzt. Die Erfahrung zeigt, dass ein Team für eine TK 25 etwa zwölf Tage benötigt. Das quellen- und oberflächengewässerreiche Bl. 5421 Ulrichstein wurde so von drei Teams in vier Tagen aufgenommen.

Bei der hydrogeologischen Kartierung wurden folgende Unterscheidungen getroffen:

- Quellen (punktuelle Grundwasseraustritte, deren Wasser vom Austrittsort aus dem Boden oder dem Gestein mit erkennbarem Gefälle ausströmt, auch Rheokrenen), Schüttungsschätzungen oder -messungen,

Kartendarstellung in Schüttungsgruppen:

- < 0,2 l/s
- 0,2–0,5 l/s
- 0,5–1,0 l/s
- > 1,0 l/s

- Quellgruppen (mehrere Quellen auf einer Fläche mit einem Durchmesser von maximal 100 m), Kartendarstellung in Schüttungsgruppen wie bei Quelle,
- Quell-Linien (mehrere Quellen, die einer Lineation wie z.B. Schichtgrenzen oder Störungen folgen), Kartendarstellung in Schüttungsgruppen wie bei Quelle,
- Quellen, die am Grund eines Tümpels, Teichs oder Sees austreten (Limnokrenen), Kartendarstellung in Schüttungsgruppen wie bei Quelle, Abfluss des Tümpels entspricht der Schüttung, Kartierung als Quelle,
- Quellen, z.Z. der Begehung trocken, jedoch im Gelände eindeutig als Quellstandort zu identifizieren (z.B. Quellmulde, Zeigerpflanzen), Hinweise auf Standorte durch Quellsignatur in TK 25 oder anderen Karten,
- Quellen, in der TK 25 oder anderen Karten eingezeichnet, jedoch im Gelände nicht mehr erkennbar,
- Nassstellen (Wasser tritt zumeist flächig aus dem Boden aus und führt zu einer mehr oder weniger starken Vernässung, auch Helokrenen und Quellfluren), ohne Abfluss,
- Nassstellen, mit Abfluss, möglichst genaue Ermittlung des Abflusses, Kartendarstellung in Schüttungsgruppen wie bei Quelle,
- Dräne, möglichst genaue Auslaufschätzungen oder -messungen, spätere Darstellung in Gruppen: trocken
  - < 0,2 l/s
  - > 0,2 l/s

• Schwinden, möglichst punktgenaue Festlegung mit Schätzung der schwindenden Wassermenge. Der Begriff Schwinde ist hierbei nicht streng nach der Definition einer Flussschwinde (DIN 4049/3, 1994) zu werten. Gemeint ist vielmehr auch der Bereich in einem Wasserlauf, in dem zumindest ein Teil des Abflusses in den Untergrund gelangt.

Bei der Kartierung der Grundwasseraustritte wurden die Lage, die Temperatur und die Schüttung bzw. der Abfluss notiert. Ferner fand eine organoleptische Prüfung des austretenden Wassers statt.

Die Grundwasseraustritte lassen sich in die gefassten und die ungefassten Grundwasseraustritte gliedern. Die ungefassten Grundwasseraustritte teilen sich in Anlehnung an die Hessische Biotopkartierung (Hessisches Ministerium des Inneren und für Landwirtschaft, Forsten und Naturschutz 1995) in die vier Typen der Sicker- und Sumpf-

quellen (Helokrenen), der Tümpelquellen (Limnokrenen), der Sturz- oder Fließquellen (Rheokrenen) und der Grundquellen. Die Helokrenen werden im Folgenden unter den Nassstellen aufgeführt. Die Limnokrenen und Rheokrenen sind als Quellen, Quellgruppen oder Quell-Linien gekennzeichnet. Grundquellen werden durch die Hessische Biotopkartierung (HB) nicht abgedeckt. Sie werden im Rahmen einer hydrogeologischen Kartierung durch Abflussschätzungen und Abflussmessungen ermittelt. Eine punktgenaue Festlegung der Grundwasseraustritte im Bach- oder Flussbett ist in den seltensten Fällen möglich.

Die während der Kartierung an den Fließgewässern ermittelten Abflussschätzungen gaben nicht nur Aufschluss über Grundquellen und Schwinden, sondern erleichterten die Planung der späteren Abflussmessungen. Daher wurden während der Kartierung günstige Abflussmessstellen kartiert.

## 5.2.2 Gewässerkartierung und Abflussmessungen

### Gewässerkartierung

Neben der Kartierung der Grundwasseraustritte ist eine detaillierte Erfassung des Gewässernetzes ein zweites wesentliches Element der hydrogeologischen Kartierung. Das Gewässernetz lässt ebenso wie die Grundwasseraustritte Rückschlüsse über den hydrogeologischen Bau des Gebirges zu. Des Weiteren lässt die Gewässerkartierung Schlüsse auf die hydraulische Anbindung der Fließgewässer an das Grundwasser zu.

Bei der Kartierung des Gewässernetzes wurden die Fließgewässer wie folgt unterteilt:

- Fließgewässer mit Wasserführung z.Z. der Begehung (zusätzliche Kartierung der in den TK 25 nicht eingetragenen Fließgewässer),
- Fließgewässer, die z.Z. der Begehung trocken waren (Trockenfallstrecken),
- Dränungsgräben und Trockengräben.

### Abflussmessungen

Die Abflussmessungen wurden nach Abschluss der hydrogeologischen Kartierungen durchgeführt. Sie dienten im Rahmen der Kartierung von Grundwasseraustritten dem weiteren Nachweis von

Grundquellen, die unmittelbar der Gewässersohle zutreten. Da der aus dem Grundwasser gespeiste Abfluss gemessen werden sollte, wurden die Abflussmessungen überwiegend in Spätsommern nach längerer Niederschlagspause durchgeführt. Während dieser Zeiträume war der Einfluss des Interflows und des oberflächigen Abflusses am Gesamtabfluss minimiert.

Abflussmessungen von Ein- bzw. Ableitungen in bzw. aus den Gewässern wurden vorgenommen, da sie anthropogene Eingriffe in das natürliche Abflussverhalten der Fließgewässer sind. Werden sie nicht berücksichtigt, entsteht ein verfälschtes hydrologisches Bild der Abflusssituation. Falsche hydrogeologische Rückschlüsse können die Folge sein.

Die Fließgewässer im Arbeitsgebiet wurden vor den Abflussmessungen in Abflusssysteme untergliedert. Die einzelnen Abflusssysteme bestehen aus den oberirdischen Einzugsgebieten der jeweiligen Hauptvorfluter, die zumeist 2. Ordnung sind. Die Abflusssysteme setzen sich aus oberirdischen Teileinzugsgebieten zusammen. Das gesamte Untersuchungsgebiet ist in 411 oberirdische Teileinzugsge-

biete untergliedert (vgl. Abb. 8-1). Das Abflusssystem der Nidda weist z.B. 35 Abflussmessstellen mit den dazugehörigen oberirdischen Teileinzugsgebieten auf.

Bei den Abflussmessungen wurde darauf geachtet, dass ein Abflusssystem möglichst innerhalb eines Tages gemessen wurde. Dadurch zeigt sich ein einheitliches Bild der Abflussverhältnisse bei gleichen Abflussbedingungen. War diese zeitliche Vorgabe nicht zu erfüllen, wurde die letzte Messung des Vortages am nächsten Tag wiederholt. Eine Vergleichbarkeit der einzelnen Abflusssysteme macht es ferner erforderlich, dass benachbarte Systeme zeitgleich oder zumindest nur mit kurzer zeitlicher Verzögerung gemessen werden.

Im Falle von Stauanlagen (z.B. Niddatalssperre) wurde vor den Abflussmessungen sichergestellt, dass deren Abgabe von Wasser konstant blieb. Gleiches gilt für andere Beeinflussungen des Abflusses. Wenn dies nicht erreicht werden konnte, wurden mittels Abflussschreiber das Volumen an Einleitungen bzw. Ableitungen festgestellt (z.B. Kläranlagen). Kontinuierliche Abflussmessungen an amtlichen Gewässerpegeln, die im Regelfall im Abstrom der Abflussmessungen lagen, zeigen, ob am Tag der durchgeführten Einzelmessung ein gleichbleibendes und damit auswertbares Abflussverhalten vorlag.

### Abflussmessmethoden

Bei den Abflussmessungen kamen im Untersuchungsgebiet eine direkte Messmethode und zwei indirekte Messmethoden zum Einsatz (Wundt 1953):

- Gefäßmessungen (direkt),
- Flügelmessungen (indirekt),
- Anemometermessungen (indirekt).

Die direkte Messmethode der Gefäßmessung erfolgt mittels Auffanggefäß. Hierbei wird die Zeit der Füllung bis zu einem bestimmten Volumen des Gefäßes ermittelt und daraus der Abfluss in l/s errechnet (Schröter 1972).

Vor Durchführung der indirekten Messmethoden wird jeweils an einer provisorisch eingerichteten Messstelle das Gewässerprofil durch Einbau lehmhinterfüllter Leitbleche und Einebnung der Gewässersohle zum Rechteck ausgebaut.

Beim Messflügel von Woltmann handelt es sich um ein Punktmessverfahren, das durch eine Propellerschraube die Fließgeschwindigkeit des Wassers indirekt über die Umdrehungszahl des Messflügels ermittelt (Abb. 5-1).

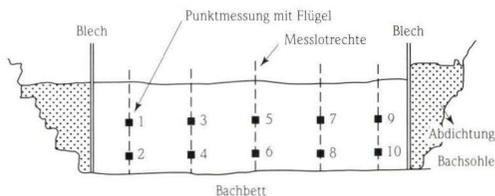


Abb. 5-1. Flügelmessverfahren.

Beim Anemometer wird dagegen ein Linienmessverfahren angewendet (Abb. 5-2). Innerhalb von 55 Sekunden muss mit dem Anemometer das

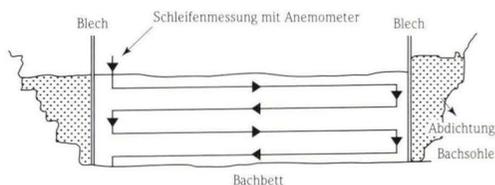


Abb. 5-2. Anemometermessverfahren.

gesamte Messprofil mit konstanter Geschwindigkeit abgefahren werden, so dass eine repräsentative Durchschnittsgeschwindigkeit errechnet werden kann. Die Recheneinheit des Anemometers ermittelt aus den je nach Gerät alle zwei bis drei Sekunden festgestellten Einzelfließgeschwindigkeiten eine Durchschnittsfließgeschwindigkeit des Wassers im Messprofil. Für diese Messmethode ist ein annähernd rechtwinkeliges Messprofil und ein laminares Fließen des Wassers im Profil zwingend notwendig, da sonst die Berechnung der mittleren Fließgeschwindigkeit mit zu großen Fehlern behaftet ist. Der Abfluss wird durch die Multiplikation der mittleren Fließgeschwindigkeit mit der Fläche des Abflussquerschnittes errechnet. Als Faustregel liegt der Anwendungsbereich des Anemometers je nach Messstellenvoraussetzungen zwischen 10 und 50 l/s. Es sollten jeweils mindestens drei Messvorgänge durchgeführt werden.

Der Einsatz des Anemometers wird durch die Breite und/oder die Tiefe des Messprofils eingeschränkt. Da nur ein begrenzter Messzeitraum von 55 Sekunden zur Verfügung steht, kann ein zu breites und/oder zu tiefes Messprofil nicht gleichmäßig mit möglichst geringer Geschwindigkeit des Messgerätes durchfahren werden. Eine zu hohe Eigenbewegung des Anemometers führt ebenso zu Messfehlern wie eine Teilung des Messprofils in Teilabschnitte. Beides sollte prinzipiell vermieden werden.

Der Vorteil des Anemometers gegenüber dem Woltmann-Messflügel liegt in seiner einfachen Handhabung und im erheblich geringeren Zeitaufwand. Während beim Woltmann-Messflügel eine Einzelmessung 50 Sekunden beträgt, ist beim Anemometer in 55 Sekunden das gesamte Messprofil durchgemessen. Die Berechnung des Abflusses und dessen Plausibilitätsprüfung ist beim Anemometer ohne Schwierigkeiten sofort nach der Messung vor Ort möglich, wogegen beim Messflügel eine nachfolgende zeitaufwändige Auswertung erforderlich ist.

Da der Messflügel des Anemometers durch ein engmaschiges Gitter vor Beschädigungen geschützt wird, kann es durch Verschmutzungen des Gitters zu Beeinträchtigungen der Messwertgenauigkeit kommen. Bei Vergleichsmessungen zwischen Woltmann-Flügel und Anemometer waren bei gleichen Messvoraussetzungen auftretende starke Abweichungen ausschließlich auf die Verschmutzung des Schutzgitters zurückzuführen. So waren in einem Fall das Abweichen der Messergebnisse durch Algen mit einer Länge von ca. 1 bis 2 mm bedingt, die sich in den Gitterkreuzen des Anemometers verfangen und somit den Durchstrom des Wassers behinderten. Bei makroskopisch verschmutztem Wasser ist der Einsatz des Anemometers daher nicht sinnvoll. Eine Drift der Messwerte des Anemometers bei Wiederholungsmessungen zu geringeren Fließgeschwindigkeiten ist immer ein Indiz für eine zunehmende Verschmutzung des Gitters vor dem Messflügel. Vor jeder Messung wurde deshalb eine Überprüfung der Sauberkeit des Wassers und eine Reinigung des Gitters durchgeführt.

### 5.3 Wassergewinnungsanlagen und Grundwassermessstellen

Für eine Grundwasserbilanzierung und hierbei insbesondere für die Betrachtung der Grundwasserneubildung, z.B. durch die Anwendung der Wasserwerksmethode (Höltling 1996) oder von statistischen Verfahren zu Abflussverhältnissen (MoMNO-Verfahren nach Wundt 1953), ist es notwendig, sämtliche Grundwasserentnahmen zu berücksichtigen. Grundwasserentnahmen aus einem geohydrologischen System führen zur Abflussminderung in der Vorflut. Diese kann, wie bei Quelfassungen, in unmittelbarer Nähe der Wassergewinnungsanlage oder, wie z.B. durch Tiefbrunnen, erst in erheblicher Entfernung zur Entnahmestelle wirksam werden. Für eine genaue Betrachtung ist es deshalb notwendig, das Entnahmevolumen und den Verbrauchsort des gefördertem Grundwassers zu kennen. Wenn das Wasser dem zu betrachtenden hydrologischen Gesamtsystem als Abwasser wieder zugeführt wird, ist eine Berücksichtigung nicht notwendig. Wird das Wasser dem örtlichen System jedoch entzo-

gen, wie dieses bei einer überregionalen Grundwasserförderung und bei großflächigen Abwasserverbänden der Fall ist, müssen die entnommenen Mengen bei einer Gesamtbilanzierung des Wasserhaushaltes berücksichtigt werden.

Bei der Datenrecherche zu den Wassergewinnungsanlagen, die bei den jeweiligen Wasserversorgern stattfand, wurden daher folgende Punkte berücksichtigt:

- Art der Wassergewinnungsanlage:
 

Quelfassung	
Flachbrunnen,	Tiefe < 10 m
Tiefbrunnen,	Tiefe > 10 m
- Nutzung,
- regionale oder überregionale Verwendung,
- Stammdaten (Rechts- und Hochwert, Ausbautiefe, Messpunkthöhe, ...),
- Ausbaupläne,
- Pumpentiefe,
- Ruhe- und Betriebswasserspiegel,
- Wasserspiegelangaben für Stichtagsmessungen,

- Förderung: tatsächlich,  
genehmigt,
- Rohwasseranalysen,
- bei Quelfassungen zusätzlich:  
Schüttung,  
Temperatur,  
el. Leitfähigkeit,  
pH-Wert,  
organoleptische Auffälligkeiten.

Für das Ermitteln des hydrogeologischen Grundwasserstockwerksbaues und der Grundwasserdynamik waren Informationen zur Tiefe, zum Ausbau und zu den Schichtenprofilen der Grundwassermessstellen und Wassergewinnungsanlagen notwendig. Erst eine Positionsanalyse und damit die Zuordnung des Grundwasserspiegels zu einem Grundwasserstockwerk ermöglicht eine plausible Konstruktion von Grundwassergleichen in einem mehrschichtigen Kluffgrundwasserleitersystem.

Für die Darstellung der Grundwasserdynamik wurden Stichtagsmessungen an den zur Verfügung stehenden Grundwassermessstellen, also auch an den Grundwassergewinnungsanlagen, durchgeführt. Da annähernd zeitgleiche Messungen die hydraulische Situation am besten wiedergeben, wurde der Messzeitraum auf einen Monat (September 1994) begrenzt. Die Abstichmessungen wurden

im Spätsommer vorgenommen, da zu dieser Zeit mit seinen geringen Niederschlägen am ehesten konstante hydrologische Bedingungen gegeben sind.

Die Zuordnung der Grundwasserspiegel der einzelnen Grundwassermessstellen und Grundwassergewinnungsanlagen zu den verschiedenen Potenzialflächen kann bei unterschiedlichen hydraulischen Voraussetzungen zu verschiedenen Ergebnissen führen. Dies ist besonders dann der Fall, wenn der Ausbau einer Messstelle hydraulische Kontakte zwischen unterschiedlichen Grundwasserstockwerken begünstigt. Eine Automatisierung der Darstellung von Grundwassergleichen sollte daher unterbleiben oder zumindest in jedem Fall genauestens auf Plausibilität überprüft werden.

Die Datenrecherche zu den Wassergewinnungsanlagen und Grundwassermessstellen wurde vor der hydrogeologischen Kartierung durchgeführt. So war es möglich, die bereits vorhandenen Daten in einem Arbeitsschritt mit der Aufnahme der Grundwasseraustritte und des Gewässernetzes vor Ort zu überprüfen. Eine erst nach den Geländearbeiten beginnende Datenrecherche würde einen erheblich größeren zusätzlichen Zeitaufwand erfordern, da dann eine zweite Begehung des Untersuchungsgebietes notwendig würde.

## 5.4 Datenerhebung zur Grundwasserbeschaffenheit und Isotopenhydrologie

In Hessen liegen Daten zur Grundwasserbeschaffenheit von Trinkwassergewinnungsanlagen seit 1991 bei der Hessischen Landesanstalt für Umwelt (HLfU), nach 1999 beim Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) vor. Aufgrund der Rohwasseruntersuchungsverordnung (GVBl. I, S. 200) vom 19.05.1991 des hessischen Umweltministeriums sind alle Betreiber von Wassergewinnungsanlagen verpflichtet, „die Beschaffenheit des zur Wasserversorgung gewonnenen Wassers (Rohwassers)“...“zu untersuchen oder untersuchen zu lassen“ (§1 der Verordnung).

Die hydrochemischen Untersuchungen werden jährlich durchgeführt, bei aktuellem Anlass auch in kürzeren zeitlichen Abständen. Nitrat-Konzentrationen werden in der Regel vierteljährlich festge-

stellt. Sämtliche Daten zur Grundwasserbeschaffenheit werden in digitaler Form zentral beim HLUG gesammelt und verwaltet.

Isotopenhydrologische Untersuchungen fallen nicht unter die Rohwasseruntersuchungsverordnung von Hessen. Daher wurden vom 15.04.1996 bis zum 19.04.1996 an 32 Messstellen isotopenhydrologische Probenahmen durchgeführt. Im September 1996 wurde zusätzlich eine Probe an der Forschungsbohrung Ulrichstein aus einer Tiefe von 588 m u. GOK genommen. Die Isotopen wurden im Rahmen der Geowissenschaftlichen Gemeinschaftsaufgaben (GGA), Hannover, gemessen.

Bei der Beprobung der Grundwassermessstellen und Quellen bzw. bei der Auswertung der Analysen wurden folgende Punkte berücksichtigt:

Bohrlöcher bzw. ihre spätere Verwendungsart als Grundwassermessstelle oder als Wassergewinnungsanlage stellen im Vogelsberg oft hydraulische Verbindungen zwischen mehreren Grundwasserstockwerken her. Die Gründe hierfür liegen zum einen bei der fast immer fehlenden Information zur Hydraulik im Bohrloch, die durch geophysikalische Bohrlochmessmethoden zur Hydrodynamik und durch geohydraulische Pumpversuche ermittelt werden können (Beims 1996, Lux 1996). Zum anderen zielt der Ausbau der Wassergewinnungsanlagen auf ein Maximum an Förderleistung. Die hydraulische Anbindung von mehreren Grundwasserstockwerken in einem Brunnen kann daher aus wasserwirtschaftlicher Sicht gewollt sein. Eine Probenahme aus solchen Grundwassermessstellen oder Wassergewinnungsanlagen ergibt eine Mischprobe aus allen durch die Messstelle in Verbindung stehenden Grundwasserstockwerken. Die Probe weist somit einen extrem punktuellen Charakter auf, der die hydrochemische Situation des Wassers im Bohrloch, geschaffen durch die künstliche hydraulische Anbindung von mindestens zwei Grundwasserstockwerken, widerspiegelt.

Eine Quellbeprobung ist dagegen vergleichsweise unproblematisch. Es muss jedoch sicherge-

stellt sein, dass die Beprobung am eigentlichen Grundwasseraustritt aus dem Gestein, also an dem Ort, an dem das Grundwasser nach seiner Untergrundpassage aus dem Gestein fließt, vorgenommen wird. In Tallagen oder auch an Hängen mit Schuttüberdeckung stimmt die Grundwasseraustrittsstelle aus dem Festgestein nur selten mit dem Quellaustritt überein, da das Grundwasser zuvor meist erst eine mehr oder weniger lange Wegstrecke durch die Schutt- und Bodenschichten zurücklegt, bevor es zu Tage tritt. Hierbei kann ein Teil des Wassers adsorptiv oder kapillar an der Bodenmatrix fest gehalten oder durch Wasseraufnahme von Pflanzen verbraucht werden, so dass die Quellschüttung gegenüber der möglichen Schüttung verringert ist. Dies ist insbesondere bei Trockenwetterphasen und zu Zeiten mit starker Vegetation der Fall. Bei der Passage des Wassers durch Schuttdecke und Bodenzone kommt es zu einer umfangreichen chemischen, physikalischen und biologischen Beeinflussung der Grundwasserbeschaffenheit, die zu einer so starken Überprägung führen kann, dass der ursprüngliche hydrochemische Charakter des Wassers eine untergeordnete Rolle einnimmt.

## **6. Hydrogeologie**

### **6.1 Stand der Forschung**

#### **6.1.1 Hydrogeologische Modellvorstellungen von Vulkanitkomplexen**

Etwa 8% der Erdoberfläche bestehen aus vulkanischen Gesteinen. Hiervon weist etwa die Hälfte eine basaltische Zusammensetzung auf (Meybeck 1987). Die Wasserwegsamkeiten in den unterschiedlichen vulkanischen Gesteinsabfolgen sind von Trennfugen- und Porensystemen in den Lavaströmen und den vulkaniklastischen Lagen abhängig, die in unterschiedlichen Mächtigkeiten in Wechselfolgen vorliegen.

Der Hohlraumanteil beträgt bei dichten Basalten und Andesiten weniger als 1%, bei Lagern und Gängen weniger als 5%, bei Effusivgesteinen zwischen 1 und 10% und bei blasigen Vulkaniten zwi-

schen 10 und 50% (Davis & DeWiest 1967, Heitfeld 1965, Krynine & Judd 1957, Morris & Johnson 1967, Schoeller 1962). Porositätsuntersuchungen an Gesteinsproben von den Kanarischen Inseln ergaben Werte zwischen 5 und 60% (Custodio 1978, Moffet 1973, UNESCO SPA-15 1975). Der Spitzenwert von 60% wurde an einer schlackig ausgebildeten Brekzienzone eines Aa-Lavastroms gemessen (Custodio 1978).

Die Nutzporosität fällt jedoch zumeist sehr viel geringer aus, da die Blasen Hohlräume der Eruptivgesteine nicht in hydraulischer Verbindung miteinander stehen. Die Gesamtporositäten für basalti-

sche Laven von La Palma betragen zwischen 5 und 30%, während die ermittelten Nutzporositäten lediglich zwischen 0 und 10% liegen (UNESCO SPA-15 1975). Ausnahmen können Gesteinsschlacken und Brekzienzonen bilden (Mattheß & Ubell 1983).

Untersuchungen zur Porosität unverwitterter Vulkaniklastika ergaben an Aschen und Lapilli der Kanarischen Inseln Werte zwischen 25 und 50% (Custodio 1978). Schoeller (1962) nennt Porositäten von 6–87%, wobei die Spitzenwerte beim Bims (50–87%) erreicht werden. Mit zunehmender Alterung und durch Kompaktion schließen sich die Porenräume in den vulkaniklastischen Lagen weitgehend. Custodio (1989) fand  $k_f$ -Werte an tonig verwitterten Pyroklastika von weniger als  $10^{-8}$  m/s. Andere Untersuchungen nennen Werte zwischen  $10^{-15}$  und  $10^{-6}$  m/s (Keller 1961, Heitfeld 1965, Morris & Johnson 1967).

Morris & Johnson (1967) untersuchten unterschiedliche Basaltvorkommen in den USA. Sie fanden Gesteinsdurchlässigkeiten zwischen  $10^{11}$  und  $10^7$  m/s, im Mittel von  $10^{-8}$  m/s. An Vulkaniten in Marokko bzw. Brasilien durchgeführte Messungen von Gebirgsdurchlässigkeiten wiesen Werte von  $10^{-4}$ – $10^{-3}$  m/s bzw.  $10^{-9}$ – $10^{-6}$  m/s auf (Mortier et al. 1967, Franciss 1970). Custodio (1978, 1989) ermittelte Durchlässigkeitsbeiwerte ( $k_f$ ) zwischen  $10^{-2}$  m/s an rezenten Schlacken,  $10^{-3}$ – $10^{-4}$  m/s an pleistozänen Basalten und bis zu  $10^{-8}$  m/s an massiven dichten Laven und alterierten submarinen Vulkaniten.

Die Durchlässigkeit von vulkanischen Gesteinen nimmt allgemein mit zunehmendem Alter ab (Davis 1974). Hydrogeologische und hydrochemische Untersuchungen (Bistry 1997, König 1997) auf La Palma bestätigen, dass mit steigender Alteration und Kompaktion sowie der daraus resultierenden Verwitterung und Bildung von sekundären Mineralen die Gebirgsdurchlässigkeit abnimmt. Untersuchungen von Hjartarson (1980, in Karrenberg 1981) an isländischen Vulkaniten zeigen, dass eine deutliche Abnahme der Durchlässigkeit von rezenten bis jungpleistozänen (0–0,7 Mio. Jahre) über altpleistozänen (0,7–3,1 Mio. Jahre) bis zu tertiären Vulkaniten (> 3,1 Mio. Jahre) zu verzeichnen ist. Die tertiären Gesteine weisen dabei eine deutliche hydrothermale Zersetzung und eine fortge-

schriftene Zeolithisierung auf, die die Permeabilität verringert. Während bei jungen Gesteinen das Wasser durch Poren und Fugen fließt, nimmt die Bedeutung der Fugen für die Wasserwegsamkeit mit zunehmendem Alter der Gesteine zu. Durch Mineralneubildungen kann es, wie bei den ältesten isländischen Vulkaniten, zu einer fast vollständigen Wasserundurchlässigkeit kommen.

In den vulkanischen Schichten ist von einer zweidimensionalen Anisotropie der Gebirgsdurchlässigkeit auszugehen (Custodio 1985, Custodio et al. 1988). Die horizontale Durchlässigkeit ( $k_{fn}$ ) ist hierbei größer als die vertikale Durchlässigkeit ( $k_{fv}$ ). Gänge, die unabhängig vom Alter eine geringe Porosität (< 5%) haben, führen dazu, dass vertikale Wasserwegsamkeiten geschaffen und horizontale Wasserwegsamkeiten gehemmt werden (Davis & DeWiest 1967, Karrenberg 1981, Staudigel et al. 1986). Ihr Anteil kann dabei bis zu 95% des Gesteinsvolumen betragen (Staudigel et al. 1986, Coello 1987).

Den horizontalen Grundwasserfluss hemmen besonders fossile Bodenbildungen und kompaktierte Vulkaniklastika (Servicio Hidráulico 1992). Die Paläoböden Teneriffas („Almagres“) bilden dabei impermeable Schichten, die eine Ausbreitung von mehreren Quadratkilometern erreichen und wichtige Quellhorizonte darstellen. Vertonte Brekzien („Mortalón“) nehmen eine ähnliche Stellung ein (Hoppe 1995).

Vergleichbare hydrogeologische Verhältnisse werden vom indischen Deccan-Trapp beschrieben, der aus einer weitgehend horizontal gelagerten Abfolge von bis zu 35 m mächtigen Basaltflows besteht (Adyalkar et al. 1974, Singhal 1974). Die Wasserbewegung in den relativ alten Basalten (Oberkreide bis Eozän) findet auf horizontalen und vertikalen Trennfugen statt. Den Basalten zwischengeschaltet sind Sedimente und Vulkaniklastika. Gespannte Grundwässer werden häufig angetroffen.

Die Hawaii-Inseln bestehen aus einer raschen Abfolge von geringviskosen Laven, die mit 5 bis  $10^9$  einfallen. Bodenbildungen zwischen den einzelnen Lavaflows sind weitgehend unbekannt. In der Gesteinsabfolge hat sich ein offensichtlich zusammenhängender Grundwasserkörper („basal water table“) ausgebildet, der sich nur wenig oberhalb des

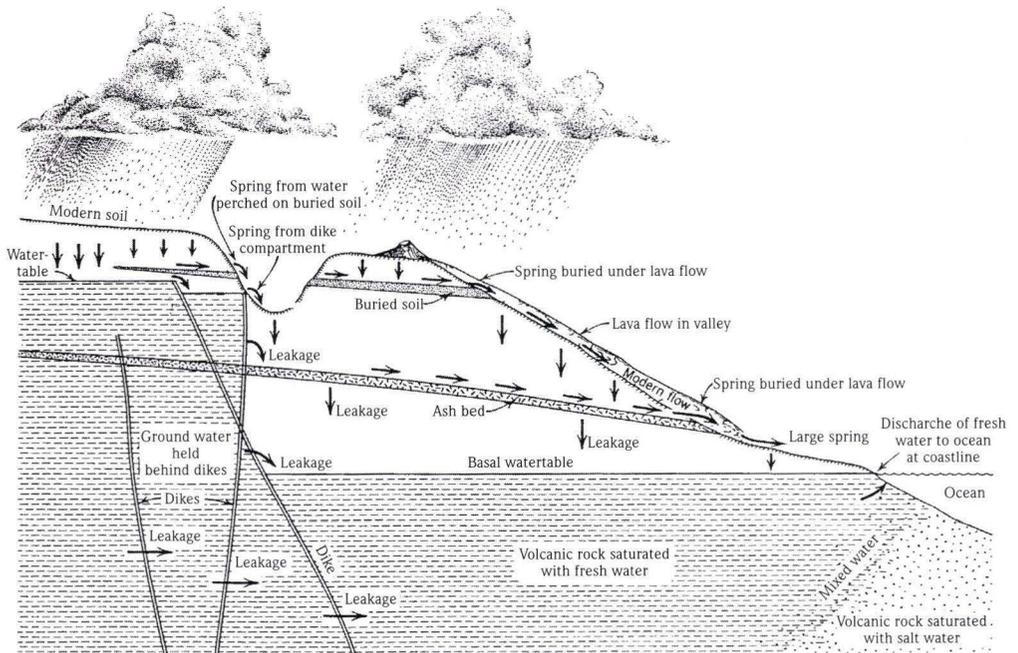
Meeresniveaus befindet (Lao 1973). Die Permeabilität der zum größten Teil unverwitterten bzw. nur schwach verwitterten Laven ist allgemein groß.

Die verschiedenen geologischen Bedingungen und vorwiegend wasserwirtschaftlichen Fragestellungen in den weltweit vorkommenden Vulkankomplexen haben zu unterschiedlichen hydrogeologischen Modellkonzepten für die einzelnen Vulkangebiete geführt. Ähnliche bis gleiche Beobachtungen wie das Nebeneinander von extrem niedrigen mit sehr hohen Durchlässigkeiten oder das Auftreten von gespannten und freien Grundwasseroberflächen werden unterschiedlich interpretiert. In den einzelnen Modellkonzepten zeigen sich hierbei zum Teil Widersprüche.

Das hydrogeologische System der Deccan-Trapps wird aufgrund seiner Wechselfolge von Grundwasser leitenden mit Grundwasser nicht leitenden Schichten wie ein „sedimentäres Multiaquifer-System“ betrachtet (Karrenberg 1981). Da die Trennfugen in den Basalten aufgrund des ver-

gleichsweise hohen Alters (Oberkreide bis Eozän) und der damit einhergehenden Entwicklung von Sekundär-Mineralen über eine geringe Durchlässigkeit verfügen, wird der größte Teil der Wassergewinnung in der oberen Verwitterungszone vorgenommen.

Seit 1890 wurden auf Oahu (Insel der Hawaii-Gruppe) zur Trinkwassergewinnung 51 horizontale Stollen in das vulkanische Gestein getrieben. Hier von trafen lediglich 32 Grundwasser an. Die Ergiebigkeiten schwanken stark. In der Waianae-Range (Abb. 6-2) liegt der Abfluss zwischen 1 bis 7 700 m<sup>3</sup>/d (bis zu 90 l/s). Erst das Abteufen von Schachtbrunnen erbrachte mehr Erfolg bei der Grundwassergewinnung. Die dargestellten Erfahrungen werden auf weitgehend vertikal verlaufende, Wasser undurchlässige Gangsysteme und auf Grundwasser gering leitende Zwischenschichten, wie Bodenhorizonte und Vulkaniklastika, zurückgeführt (Abb. 6-1; Stearns & MacDonald 1946, Davis & DeWiest 1967, Lao 1973, Karrenberg 1981).

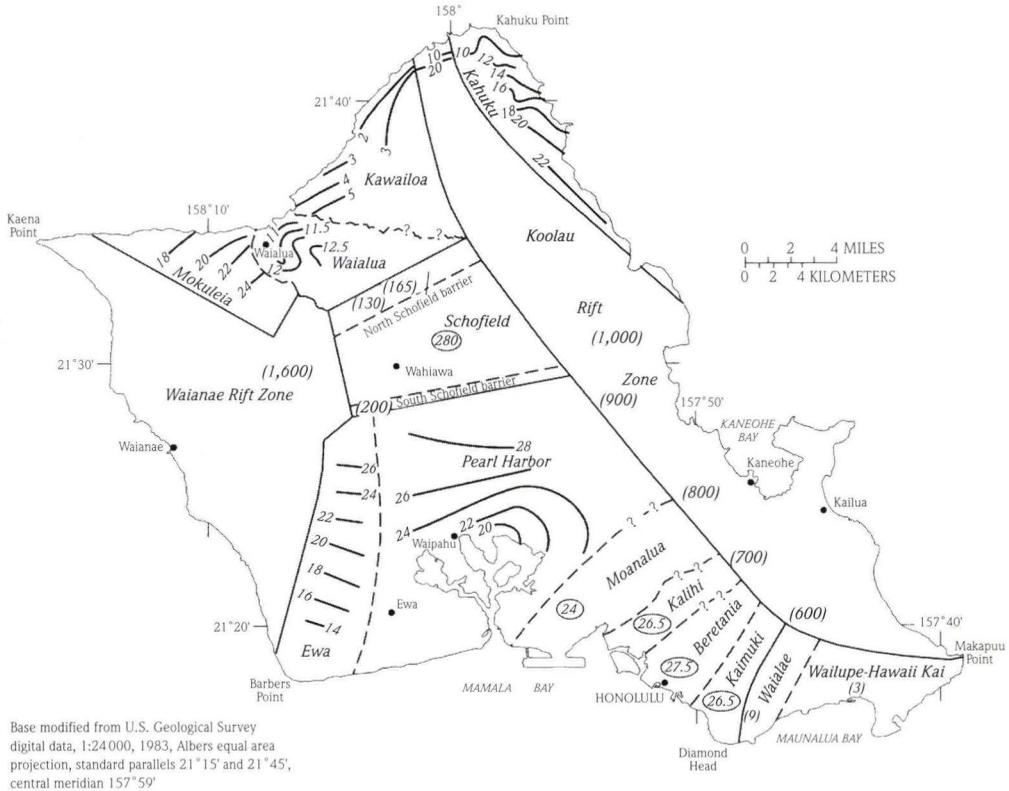


**Abb. 6-1.** Schematischer hydrogeologischer Schnitt für die Hawaii-Inseln (Stearns & MacDonald 1946, geändert von Davis & DeWiest 1967).

Das U.S. Geological Survey führte des Weiteren umfangreiche hydrogeologische Untersuchungen auf Oahu durch. Hunt (1996) unterteilt die Insel in mehrere Grundwasser-Regionen, die durch geohydraulische Barrieren voneinander getrennt sind. Für die einzelnen Grundwasser-Regionen wurden Grundwassergleichen gezeichnet (Abb. 6-2).

Für die Wasserführung in den vulkanischen Gesteinen der Kanarischen Inseln sollen vertikal verlaufende, Wasser undurchlässige Gänge von entscheidender Bedeutung sein. Ihre geringe Permeabilität soll dazu führen, dass ein mittleres Grundwassergefälle von 10% (4,5°) vorherrscht (Karrenberg 1981). Die unterschiedlichen Grundwasserspiegelniveaus der einzelnen Inseln reichen von Meeresspiegelhöhe bis auf 1 400 m (La Palma), 1 600 m (Gran Canaria) sowie maximal 2 000 m (Teneriffa). Die Grundwassergefälle betragen lokal bis zu 30% (13,5°).

fende, Wasser undurchlässige Gänge von entscheidender Bedeutung sein. Ihre geringe Permeabilität soll dazu führen, dass ein mittleres Grundwassergefälle von 10% (4,5°) vorherrscht (Karrenberg 1981). Die unterschiedlichen Grundwasserspiegelniveaus der einzelnen Inseln reichen von Meeresspiegelhöhe bis auf 1 400 m (La Palma), 1 600 m (Gran Canaria) sowie maximal 2 000 m (Teneriffa). Die Grundwassergefälle betragen lokal bis zu 30% (13,5°).



Base modified from U.S. Geological Survey digital data, 1:24 000, 1983, Albers equal area projection, standard parallels 21°15' and 21°45', central meridian 157°59'

- Ewa* SUBORDINATE GROUND-WATER AREA – Annotated with mixed case
- MAJOR GEOHYDROLOGIC BOUNDARY
- - - - SUBORDINATE GEOHYDROLOGIC BOUNDARY – Queried where uncertain
- 24 — WATER-LEVEL CONTOUR – Shows altitude of water level. Contour interval in feet, is variable. Datum is mean sea level
- (165) POINT OBSERVATION OF ALTITUDE OF WATER LEVEL, IN FEET ABOVE MEAN SEA LEVEL
- (24) REPRESENTATIVE WATER LEVEL WHERE WATER TABLE IS TOO FLAT TO BE CONTOURED, IN FEET ABOVE MEAN SEA LEVEL

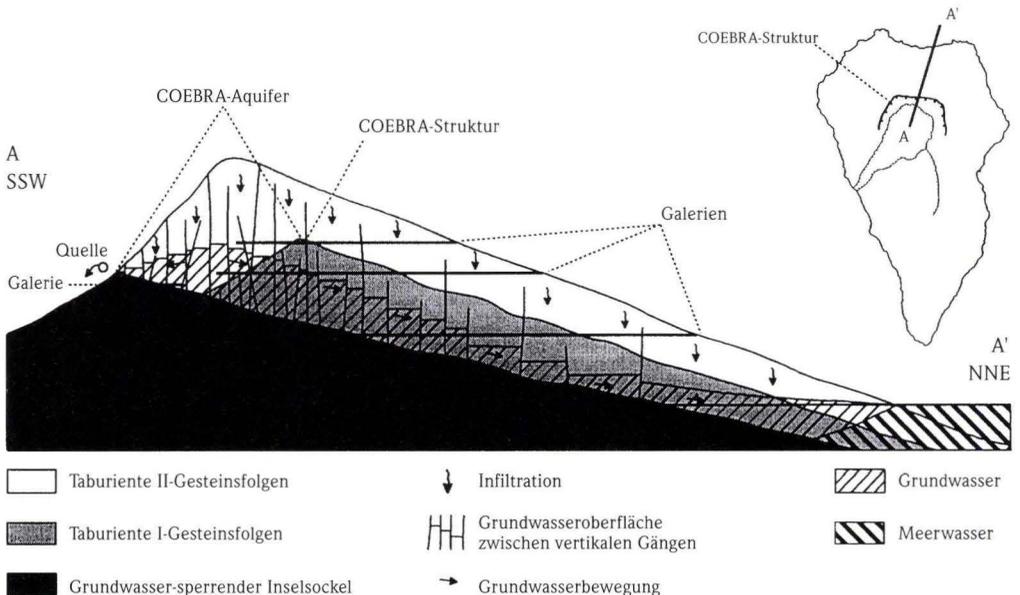
**Abb. 6-2.** Ground-water areas and potentiometric surface in the principal volcanic aquifers of the island of Oahu (compiled from previous studies by the U.S. Geological Survey), Hunt (1996).

Bohrungen und Galeriestollen haben gezeigt, dass die Wasser undurchlässigen Gänge zwar wie hydraulische Barrieren wirken können, dass es aber andererseits auch Gänge gibt, die durchlässig oder auf beiden Seiten trocken sind.

Custodio (1978) geht auf den kanarischen Inseln unter wasserwirtschaftlichen Gesichtspunkten trotz der oben beschriebenen hydrogeologischen Verhältnisse von einem quasi homogenen, zusammenhängenden Grundwasserkörper aus, der über eine freie Grundwasseroberfläche verfügt. Ecker (1974, 1976) entwickelte ein differenzierteres Modell, das oberhalb einer gedachten zusammenhängenden Grundwasseroberfläche „Wasser führende Zellen“ oder „Grundwasserkompartimente“ beinhaltet. Dies sind Wasser erfüllte Hohlräume, die zumeist über Trennfugen in hydraulischem Kontakt stehen. Es findet bevorzugt eine vertikale Wasserbewegung statt. Die Ausbildung von Grundwasserkompartimenten wird hierbei von Gangsystemen vorgegeben. Die laterale Ausdehnung von Grundwasser sperrenden Schichten wie Bodenbildungen und vulkaniklastische Zwischenlagen habe zusätzlich lokal zu

isolierten, z.T. schwebenden Grundwasserkörpern geführt.

Das Servicio Hidráulico (1992) entwickelte ein Modellkonzept für die Insel La Palma, das vier Hauptgrundwasserleiter unterscheidet (Abb. 6-3). Diese weisen deutliche Unterschiede in ihrer regionalen Grundwasserdynamik auf. Der oberste Hauptgrundwasserleiter umgibt konzentrisch den Nordteil der Caldera de Taburiente und wird nach unten vom Inselsockel bzw. von einer erosiven Diskordanz, in der sich ein wasserstauer Bergsturz befindet, begrenzt. Das Grundwasservorkommen erstreckt sich bis auf 1 600 m ü. NN. Ein Teil des Grundwasserabflusses erfolgt über Schichtquellen, die sich an der Grenze zwischen dem Grundwasser nicht leitenden Inselsockel und den überlagernden Grundwasser leitenden Gesteinen ausgebildet haben. Das hydraulische Gefälle der unterschiedlichen Hauptgrundwasserleiter wird mit abnehmender Höhe geringer. Während der Vertiente-Grundwasserleiter noch über einen hydraulischen Gradienten von 0,15 verfügt, weist der tiefer gelegene Küsten-Grundwasserleiter nur noch einen Wert von 0,02 auf.



**Abb. 6-3.** Schematischer hydrogeologischer Schnitt durch den Nordteil von La Palma (Servicio Hidráulico 1992, geändert von König 1997).

## 6.1.2 Hydrogeologische Erforschung des Vogelsberges

Die hydrogeologische Erforschung des vulkanischen Vogelsberges ist eng verknüpft mit seiner wasserwirtschaftlichen Erschließung. Der Vogelsberg hat aufgrund natürlicher Gegebenheiten große Grundwasservorkommen, die bereits 1872 zum Bau einer Fernwasserleitung aus dem Quellgebiet Fischborn in das südlich gelegene Frankfurt a.M. führte. Am Ende des 19. und mit beginnendem 20. Jahrhundert wurden weitere überregionale Wasserwerke für die Trinkwasserversorgung der Bevölkerung außerhalb des Vulkankomplexes mit qualitativ hochwertigem Grundwasser gebaut. Die Wassergewinnung beschränkte sich hierbei weitgehend auf Quellfassungen und Schachtbrunnen, die in den Quellgebieten des Vogelsberges angesiedelt wurden.

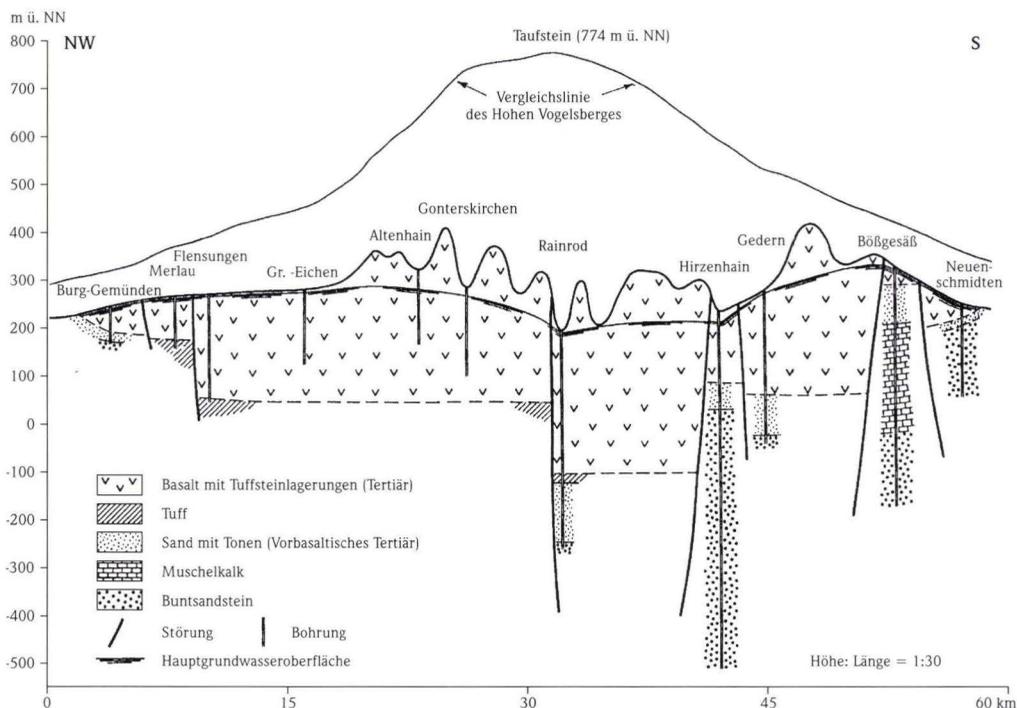
Bis in die 70er Jahre des 20. Jahrhunderts erhöhte sich der Bedarf an Trink- und Brauchwasser und damit auch das Volumen des geförderten Grundwassers aus den vulkanischen Schichten des Vogelsberges. Dies und die zunehmende Beeinträchtigung der Wasserqualität durch schädliche anthropogene Umwelteinflüsse hatten eine verstärkte Erschließung von Grundwasser durch Bohrbrunnen zur Folge. Die hierfür notwendigen Bohrungen lieferten Erkenntnisse über die geologische Struktur und über den hydrogeologischen Aufbau des Vogelsberges.

Schenk (1968) entwickelte aufgrund seiner jahrelangen Erfahrungen bei der Erschließung von Grundwasser ein Modell über die Hydrogeologie des Vogelsberges. Er beschreibt die Basalte aufgrund ihrer Klüftigkeit als sehr Wasser aufnahmefähig. Der Wechsel von Basaltlagen mit Paläoböden, Tuffschichten und tonigen Lateritdecken gliedert die vulkanische Abfolge in Grundwasserstockwerke. Der größte Grundwasserspeicherraum (bis zu 300 m Wassersäule) befindet sich nach Schenk (1968) in einer calderaartigen Einsenkung, die westlich vom Vogelsberg-Zentralgebiet liegt. Die starken Quellen im Randbereich des Vogelsberges führt er auf das Überlaufen der Wasser erfüllten Einsenkung zurück. Für das Quellgebiet bei Hungen-Inheiden werden Schüttungen zwischen 300 und 450 l/s genannt (Schottler 1944, Udluft 1957).

Anfang der 60er Jahre nahm Mattheß (1970) umfangreiche Abflussmessungen im Vogelsberg vor. Er beschreibt wie Schenk (1968) den schichtigen Aufbau aus durchlässigen Basalten mit schlecht durchlässigen tonig-lateritischen Verwitterungsdecken und Tuffen. Hieraus resultieren Grundwasserstockwerke, die übereinander entwickelt sind und unterschiedliche hydrostatische Drücke aufweisen. In den höheren Lagen des Vulkankomplexes seien örtlich schwebende Grundwasserstockwerke ausgebildet. Die über große Schüttungen verfügenden Quellgebiete wie Inheiden, Lauter, Queckborn und Nidda führt Mattheß (1970) darauf zurück, dass in diesen Bereichen Wasser durchlässige Basalte aus den zentralen Gebirgstteilen an Verwerfungen gegen weniger durchlässige bzw. schlecht durchlässige tertiäre Sedimente oder Tuffschichten stoßen.

Hölting (1971) unterscheidet ein zusammenhängendes Hauptgrundwasserstockwerk und schwebende Grundwasserstockwerke, die über dem Hauptgrundwasserstockwerk liegen. Die schwebenden Grundwasserstockwerke seien hierbei in klüftigen und besser durchlässigen Basaltlagen zwischen wenig durchlässigen und vielfach abdichtend wirkenden, z.T. tonig verwitterten Tufflagen ausgebildet. Wassergewinnungsanlagen, die Wasser aus den schwebenden Grundwasserstockwerken fördern, beschreibt Hölting als überwiegend leistungsschwach, da die Ausdehnung der Grundwasser leitenden Basaltlagen begrenzt sei. Die Auswertung der Spiegelgänge von Grundwassermessstellen könne bei Pumpversuchen anzeigen, inwieweit die Entnahme aus einem Grundwasserstockwerk andere Grundwasserstockwerke beeinflusse.

Wiegand (1977) greift dieses hydrogeologische Modell des Vogelsberges auf (Abb. 6-4). Er weist jedoch darauf hin, dass die Wasserdurchlässigkeit der Basalte abhängig von Kluftdichte und -weite ist. So kommen im Vogelsberg nach Wiegand neben gut geklüfteten Basaltlagen auch kluffarme, meist mächtige und massige Basaltströme und -gänge vor. Neben den kluffarmen Basalten werden als ebenfalls schlecht wasserdurchlässig Tuffe und Verlehmungszonen genannt.



**Abb. 6-4.** Schematischer Schnitt durch den westlichen Vogelsberg (Wiegand 1977).

Verschiedene Arbeiten bauen auf diesen Erkenntnissen auf. Die Erläuterungen zu den Geologischen Karten (GK) von Hessen bieten blattschnittweise einen Einblick in die jeweiligen hydrogeologischen Verhältnisse (z.B. Diederich 1975, 1986, Diederich & Wiegand 1978, Scharpf 1988).

Schmidt (1992) arbeitete im westlichen Vogelsberg. Sie konnte in den von ihr untersuchten oberirdischen Einzugsgebieten anhand von Grundwasserspiegellagen jeweils mehrere übereinander liegende Grundwasserstockwerke nachweisen. Die

Existenz von hydraulischen „Fenstern“ führen nach Schmidt zu einem vertikalen Grundwasserstrom, der sich auf die oberflächennahen Grundwasserstockwerke auswirkt.

Walter (1974), Kaiser (1976), Rousakis (1979) und Hanauer (1982) untersuchten mit überwiegend hydrologischen Schwerpunkten die Wasserhaushalte im Horloff-, Ohm-, Wetter- und Niddagebiet. Madel (1980) und Bachwinkel (1984) werteten Grundwasseranalysen aus dem Vogelsberg aus.

### 6.1.3 Wasserwirtschaftlicher Hintergrund

Die Auswahl des Untersuchungsgebietes erfolgte auch aufgrund seiner hohen landschaftlichen und wasserwirtschaftlichen Bedeutung. Die Region des Vogelsberges ist eines der ergiebigsten Förder- und Reservegebiete für Grundwasser in Hessen. Zahlreiche regionale und überregionale

Wasserwerke fördern Grundwasser zur Trinkwassernutzung aus diesem Gebiet. Die überregionalen Wasserwerke beliefern mit dem größten Teil ihrer Fördermengen das Rhein-Main-Gebiet. Rd. 35% des Trinkwassers (WRM 1994), das die Mainova AG (früher Stadtwerke Frankfurt am Main)

an die Verbraucher abgeben, stammt aus der Vogelsberg-Region.

Die Entnahme von Grundwasser führte lokal zu sichtbaren Folgen. Vereinzelt fielen Feuchtbiotope, Gewässer und Grundwasseraustritte teilweise oder auch ganz trocken. Das Interesse der betroffenen Bevölkerung spiegelt sich in der engagierten und konstruktiven Mitarbeit von Bürgerinitiativen und Interessengemeinschaften beim Erarbeiten von Wasserbewirtschaftungskonzepten für die einzelnen Bereiche der überregionalen Grundwasserentnahmen wider.

Die Prognosen des Regionalen Raumordnungsplanes Südhessen weisen für das Rhein-Main-Gebiet ein deutliches wirtschaftliches Wachstum und ein damit einhergehendes Anwachsen der Bevölkerung aus. Für den Trinkwasserbedarf bedeutet dies mittelfristig, trotz Ausschöpfung des Wassersparpotenzials, mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit eine Zunahme des Bedarfs (WRM 1994).

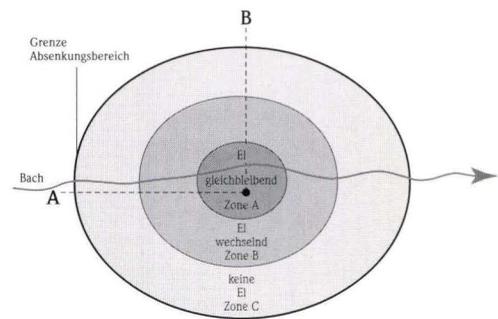
Über Teilgebiete des Vogelsberges wurde im Hinblick auf die besondere Problematik ein „Übergreifendes Gutachten zur Wassergewinnung im Vogelsberg“ vom Aachener Ingenieurbüro für Hydrogeologie und Umwelt (AHU 1993) erstellt. Abb. 6-6 gibt eine schematische Darstellung des Untersuchungsablaufes für eine umweltschonende Grundwassergewinnung im Vogelsberg.

Das Gutachten weist für die Bereiche der überregionalen Großwasserwerke in Abhängigkeit vom Flurabstand der Grundwasseroberfläche des genutzten Grundwasserstockwerkes drei Zonen (A, B, C) unterschiedlichen ökologischen Risikos aus (Abb. 6-5). In der Zone A besteht nach Aufnahme der Förderung infolge der Absenkung dauerhaft kein hydraulischer Kontakt mehr zwischen dem Förderhorizont und oberflächennahem Grundwasser. Die Eingriffsintensität (EI) ist gleich bleibend. In der Zone B wechselt die Eingriffsintensität; zwischen der Grundwasseroberfläche des Förderhorizontes und oberflächennahem Grundwasser besteht zeitweise ein hydraulischer Kontakt. In der

Zone C bestand und besteht kein hydraulischer Kontakt zwischen dem Förderhorizont und oberflächennahem Grundwasser. Es findet somit kein Eingriff durch die Grundwasserförderung in der Zone C statt.

Die von der AHU (1995) und vom Hessischen Ministerium für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit (HMUEJFG 1996) empfohlenen Beweissicherungsmaßnahmen wurden von den zuständigen Wasserbehörden im Zuge der Wasserrechtserteilung für die einzelnen Gewinnungsgebiete angeordnet.

Im Rahmen der o.g. Arbeiten zeigten sich Lücken im hydrogeologischen Kenntnisstand über die Vogelsberg-Region. Des Weiteren ergaben sich Fragestellungen, die insbesondere die großflächige hydrogeologische Struktur des Vogelsberges betreffen. Dies nahm das Hessische Landesamt für Bodenforschung zum Anlass, eine hydrogeologische Systembeschreibung der Vogelsberg-Region zu erarbeiten (Leßmann 1995, 1997). Ziel der Arbeit ist es somit, neben der grundlegenden wissenschaftlichen Bearbeitung auch die bis in regionale Details nachvollziehbare Grundlage für eine ökologische Grundwasserbewirtschaftung der Vogelsberg-Region zu liefern.



**Abb. 6-5.** Schematische Darstellung der Eingriffsintensität (EI) bei einer Grundwasserförderung mit gleichbleibender Fördermenge (AHU 1995).

## 6.2 Grundwassererschließung und Grundwasserförderung

Im letzten Jahrhundert und über weite Teile des 20. Jahrhunderts fand eine dezentrale Wasserversorgung über zumeist hauseigene oder gemeinschaftliche Schöpfbrunnen oder Quelfassungen in der Vogelsberg-Region statt. Die Abwasserentsorgung erfolgte über Sickergruben oder direkt über die Vorfluter. In zahlreichen großflächigen Quellgebieten und in weiten Bereichen der Flussauen war aufgrund der hohen Grundwasserstände eine landwirtschaftliche Nutzung oder eine Besiedlung nicht möglich, da eine fast permanente Vernässung gegeben war. Stellenweise bildeten sich Niedermoore.

Südlich vom Vogelsberg liegt das stark industrialisierte und damit dicht besiedelte Rhein-Main-Gebiet mit seinem Zentrum Frankfurt. Die Verantwortlichen der Stadt Frankfurt erkannten bereits sehr früh, dass der stetig steigende Wasserbedarf aus eigenen Wasservorkommen nicht gedeckt werden konnte. Dies führte 1872 und 1873 zum Bau der ersten Fernwasserleitung im Vogelsberg. Sie verläuft vom Quellgebiet Fischborn nach Frankfurt. Bis heute besitzt die Mainova AG (früher Stadtwerke Frankfurt am Main) ein Wasserrecht für die Quelfassungen und Wasserstollen Aderborn, Aderweiher, Obere und Untere Aue sowie Alter See in Fischborn. Im Jahr 1995 flossen rd. 2,35 Mio. m<sup>3</sup>/a Grundwasser aus dem Wassergewinnungsgebiet Fischborn durch die inzwischen erneuerte Fernleitung.

Die Idee einer Fernversorgung mit qualitativ hochwertigem Grundwasser aus dem Vogelsberg setzte sich am Ende des 19. und mit beginnendem 20. Jahrhundert weiter durch. Hierbei wurde das natürlich zutage tretende Grundwasser in Quellgebieten genutzt. Nach dem Wasserwerk Fischborn wurden die Gebiete Queckborn für die Stadt Gießen, Lauter durch das Staatsbad Bad Nauheim sowie Wirthheim, Inheiden und Neuenschmidten für die Stadt Frankfurt erschlossen.

Mit der sich verstärkenden Industrialisierung und dem damit einhergehenden Wohlstand wuchsen die Ansprüche an die Wasserversorgung. Dies macht sich durch einen sprunghaften Anstieg beim Bau von Schachtbrunnen und Quelfassungen im

Arbeitsgebiet bemerkbar. Während in den 90er Jahren des 19. Jahrhunderts nur acht Wassergewinnungsanlagen gebaut wurden, waren es zwischen 1900 und 1909 fünfzig Anlagen. In den darauf folgenden Jahrzehnten sank diese Zahl wieder ab. In den Kriegsjahren des 2. Weltkrieges wurde fast keine Anlage in Betrieb genommen (Abb. 6-7).

Nach dem Ende des Krieges und mit dem Wirtschaftsaufschwung der 50er und 60er Jahre wurden 175 Wassergewinnungsanlagen gebaut. Während früher Quelfassungen dominierten, wuchs nun der Anteil an Tiefbrunnen. In diesen Zeitraum fällt der Ausbau bestehender Anlagen wie Inheiden, aber auch der Bau neuer Wasserwerke wie Kohden, Rainrod und Orbes im Niddatal sowie Wetterfeld. Das starke Anwachsen der Industrie, strukturelle Änderungen in der Landwirtschaft und ein verändertes Konsumverhalten der Bevölkerung führten zu qualitativen Problemen beim oberflächennahen Grundwasser. Bestehende Quelfassungen wurden durch Tiefbrunnen ersetzt. In den 70er Jahren speisten weitere 72 Wassergewinnungsanlagen in die Versorgungsnetze ein. Hierzu gehörten die Brunnen der Wasserwerke Gedern/Merkenfritz, Gettenbach, Kirchbracht und der Ausbau des Wasserwerkes Wetterfeld.

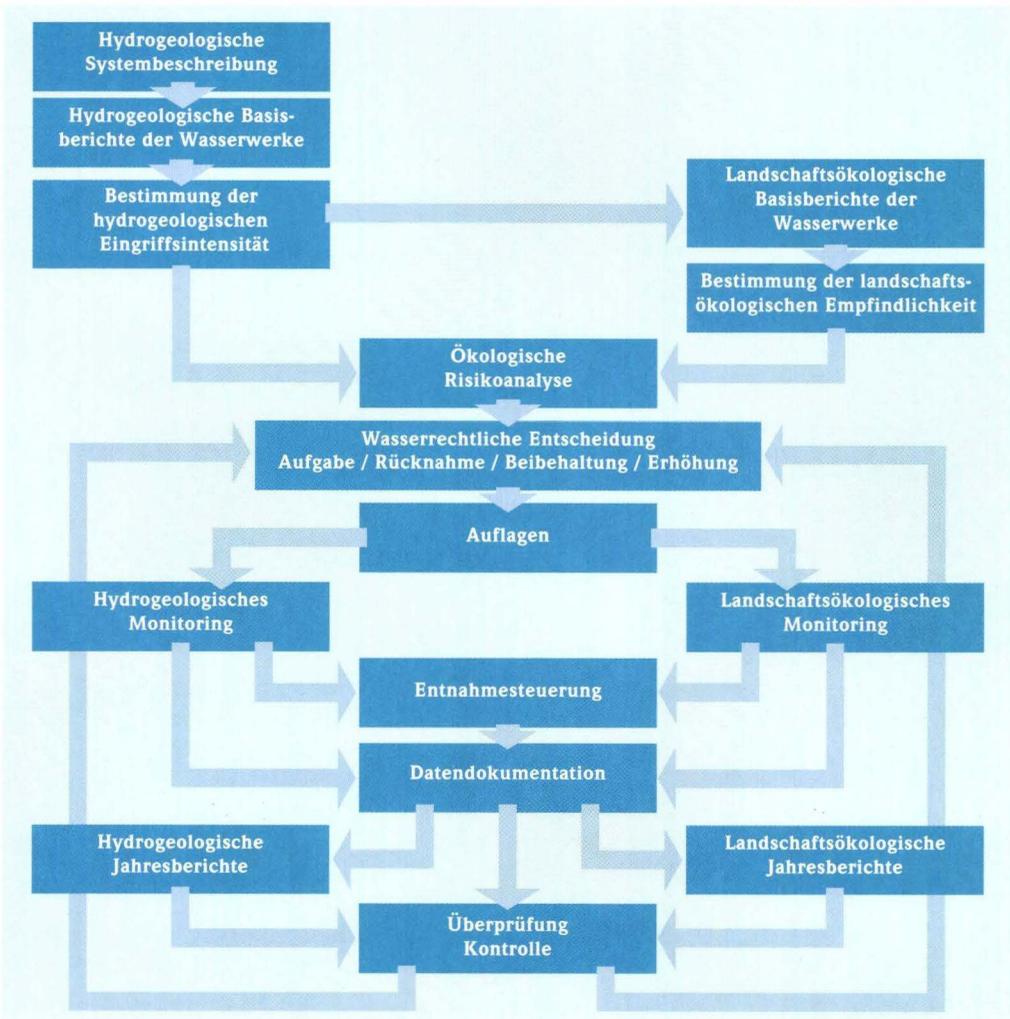
Ein verändertes Umweltbewusstsein in der Bevölkerung seit den 70er Jahren führte dazu, dass bereits komplett fertig gestellte Wasserwerke, wie Breitenborn, Groß-Eichen, Groß-Felda, Illnhausen, Mauswinkel, Merlau, Ober-Ohmen und Salz, aus ökologischen Gründen nicht mehr ans Netz gingen, da ein irreparabler Eingriff in die Natur befürchtet wurde. Die prognostizierte Entnahmemenge für diese Wassergewinnungsgebiete liegt bei knapp 41 Mio. m<sup>3</sup>/a. Die Erhaltung von schützenswerten Feuchtbiosphären mit einer seltenen Fauna und Flora wurde einem weiteren Ausbau der Wassergewinnung übergeordnet. Mit der inzwischen fast in der gesamten Bevölkerung stattgefundenen Bewusstseinsänderung im Umweltbereich fand in den 80er und 90er Jahren eine bis heute anhaltende Kehrtwende in der Wasserpolitik statt. Nicht der Bau neuer Anlagen, sondern eine nachhaltige Förderung bei den bestehenden Brun-

nen unter Berücksichtigung ökologischer Gesichtspunkte steht seitdem im Vordergrund.

Für die Wasserwerke mit überregionaler Bedeutung im Vogelsberg bedeutete dies, dass eine zunächst umfangreiche Neubearbeitung der vorliegenden Daten und deren einheitliche Bewertung erfolgte (AHU 1993). Hierbei wurden Absenkungsbereiche und Zonen möglicher landschaftsökologischer Auswirkungen für jedes Wassergewinnungsgebiet aufgezeigt. Im Weiteren wurde ein Leitfa-

den zur umweltschonenden Wassergewinnung konzipiert und entwickelt (AHU 1995). Der Leitfaden steht den Wasserbehörden und den Wasserversorgern seit Ende 1995 zur Durchführung von detaillierten Untersuchungen zur Verfügung und ist verbindlich in den einzelnen wasserrechtlichen Verfahren umzusetzen. Als wichtigste Ziele wurden hierbei drei Leitlinien formuliert:

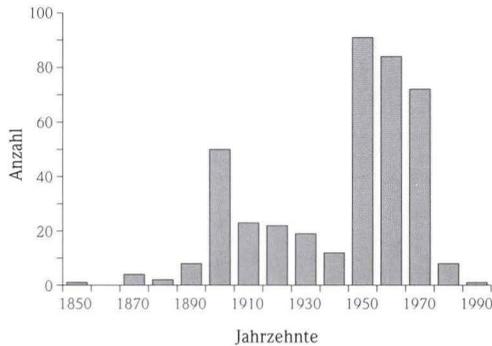
- Nicht erforderliche Eingriffe in den Wasserhaushalt sind zu vermeiden. Beim Nachweis des Was-



**Abb. 6-6.** Untersuchungen und Vorgehensweise bei der umweltschonenden Grundwassergewinnung im Vogelsberg (Leßmann et al. 2000, überarbeitet nach AHU 1995).

serbedarfs sind Wassersparpotenziale zu berücksichtigen, z.B. durch Begrenzung der Wasserverluste und Verringerung des Wasserverbrauchs.

- Die Nass- und Feuchtgebiete des Vogelsberges sind zu erhalten und zu schützen. Die Höhe der zukünftigen wasserrechtlichen Genehmigungen soll sich am Schutz der noch bestehenden Feuchtgebiete orientieren.



**Abb. 6-7.** Der Bau von Wassergewinnungsanlagen seit 1840.

- Vorhandene landschaftsökologische Regenerationspotenziale in schon geschädigten Feuchtgebieten sollen ausgeschöpft werden. Dies kann durch Förderrücknahmen in Kombination mit anderen Maßnahmen erfolgen.

Die Umsetzung der Umweltqualitätsziele soll durch wasserrechtliche Genehmigungen und Auflagen erfolgen, die von einer ökologischen Risikoanalyse ausgehen. Diese beruht wiederum auf der hydrogeologischen und der landschaftsökologischen Systembeschreibung des einzelnen Wasserwerks. Die ökologische Risikoanalyse verknüpft die Eingriffssintensität der Grundwasserentnahme auf den Bodenwasserhaushalt und die ökologische Empfindlichkeit des Naturhaushaltes gegenüber einer solchen Änderung. Die Kontrolle der Grundwasserförderung und deren Auswirkungen soll nach der Wasserrechtsvergabe durch ein kontinuierliches Monitoring gegeben werden, das ebenfalls die Bereiche Hydrogeologie und Landschaftsökologie abdeckt (Abb. 6-6). Dieses Instrumentarium soll gewährleisten, dass die Grundwassergewinnung umweltschonend den jeweiligen Bedingungen angepasst wird und neue Erkenntnisse kurzfristig umgesetzt werden.

## 6.3 Hydrogeologische Zonen

### 6.3.1 Grundwasseraustritte (GWA)

Bei der in den Spätsommern der Jahre 1994, 1995 und 1997 durchgeführten hydrogeologischen Kartierung wurden durch eine flächendeckende Begehung in dem über 32 Blätter (TK 25) verteilten Arbeitsgebiet insgesamt 3963 Grundwasseraustritte (2555 GWA im Vogelsberg, 1408 GWA in den Randgebieten) kartiert. Das entspricht einer mittleren Dichte von 1,3 GWA/km<sup>2</sup>. Von den kartierten Grundwasseraustritten entfallen 1345 (33,9%) auf Einzelquellaustritte, 358 (9,0%) auf Quellgruppen, 1647 (41,6%) auf Nassstellen und 613 (15,5%) auf Dränungen. Es wurden weiterhin 185 Schwinden kartiert. Die tatsächliche Anzahl an Schwinden und Dränen im Arbeitsgebiet liegt wahrscheinlich weit über der kartierten Menge.

Der im vulkanischen Vogelsberg gelegene Teil des Arbeitsgebietes, der mit einer Fläche von rd.

2300 km<sup>2</sup> einen Anteil von 70% am Arbeitsgebiet hat, weist eine Grundwasseraustrittsdichte von 1,2 GWA/km<sup>2</sup> auf. Auf einer Fläche von rd. 1000 km<sup>2</sup> wurden in den nichtvulkanischen Gebieten 1408 Grundwasseraustritte aufgenommen. Das entspricht einer mittleren Grundwasseraustrittsdichte von 1,1 GWA/km<sup>2</sup>.

Die Grundwasseraustritte sind im vulkanischen Vogelsberg ungleichmäßig verteilt. Der Oberwald hat mit 2,8 GWA/km<sup>2</sup> die höchste Grundwasseraustrittsdichte (Abb. 6-8). An den Flanken des vulkanischen Vogelsberges werden dagegen nur Dichten um 0,5 GWA/km<sup>2</sup> erreicht. Erst mit zunehmender Entfernung vom Oberwald und abnehmender Höhe steigen die Grundwasseraustrittsdichten am Rand des Vulkankomplexes wieder an.

Nach TK 25 gegliedert sind die mit Abstand höchsten Grundwasseraustrittsdichten auf den

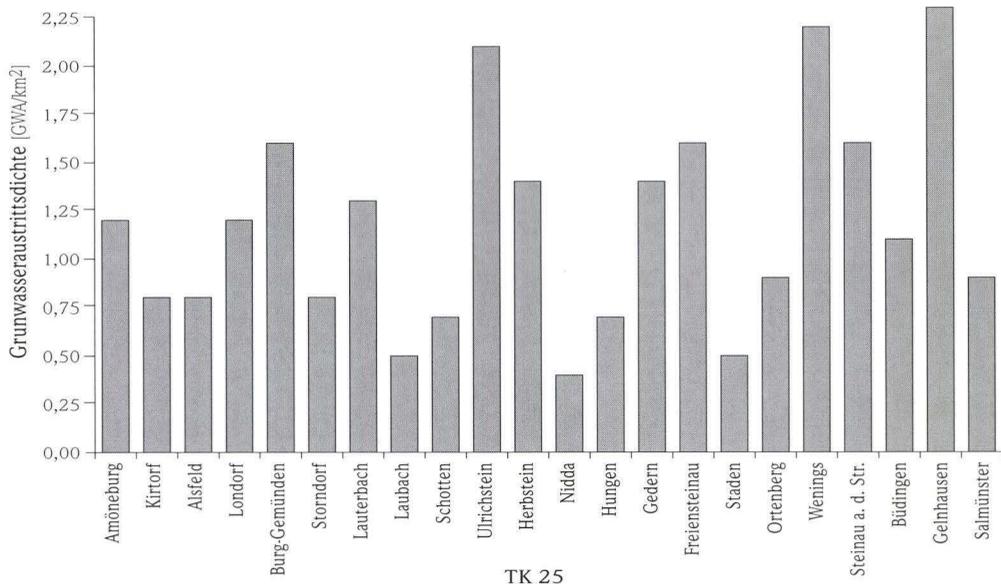


Abb. 6-8. Verteilung der Grundwasseraustritte nach TK 25 (nur komplett kartierte TK 25).

Blättern Gelnhausen (2,3 GWA/km<sup>2</sup>), Wenings (2,2) und Ulrichstein (2,1) (Abb. 6-8). Das Bl. Ulrichstein befindet sich im zentral gelegenen Hohen Vogelsberg und deckt den Gipfelbereich des Vulkangebietes ab. Die Blätter Wenings und Gelnhausen liegen im Süden des Vogelsberges am Übergang zwischen den vulkanischen Gesteinen und ihren unterlagernden Schichten. Während das Bl. Wenings durch vulkanische Gesteine mit einer Verbreitung von 121 km<sup>2</sup> (92%) geprägt wird, kehrt sich demgegenüber das Verhältnis von Basaltfläche zu überwiegend Buntsandsteinfläche auf dem direkt südlich von Bl. Wenings angrenzenden Bl. Gelnhausen um. Hier sind bei einer Blattgröße von 132 km<sup>2</sup> nur noch 22 km<sup>2</sup> (17%) von vulkanischen Gesteinen überdeckt. Bei beiden Blättern ist eine Häufung der Grundwasseraustritte an der Gesteinsgrenze Basalt/Sandstein zu beobachten.

Der Basalt verfügt gegenüber den unterlagernden Sandsteinen über die höhere Gebirgsdurchlässigkeit. Die wassererfüllten, vulkanischen Grundwasserleiter enden naturgemäß über den geringer durchlässigen Gesteinen; es kommt zur Ausbildung von Schichtquellen, die die Basaltverbreitungsgren-

ze nachzeichnen. Beim überwiegenden Teil der Grundwasseraustritte im Arbeitsgebiet handelt es sich um solche Schichtquellen, die im Ausbissbereich Grundwasser gering leitender bzw. Grundwasser nicht leitender Schichten liegen. Eine zweite Gruppe wird von Hangschuttquellen gebildet.

Die Verteilung der Grundwasseraustritte (Abb. 6-8) und die Auswertung der Abflussspenden und Abflussabgaben (Kap. 8.1, Abb. 8-1) zeigen, dass der Vogelsberg in drei hydrogeologische Zonen untergliedert ist (Abb. 6-9):

- die **Oberwaldzone (1)**,
  - die **Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke (2)**,
- mit einer Untergliederung in 2 Typen:

**2A-Grundwasserstockwerke (2A)**, die über eine Zusickerung von Grundwasser verfügen, das im Bereich des Oberwaldes gebildet wird;

**2B-Grundwasserstockwerke (2B)**, die über keine Zusickerung von Grundwasser verfügen, das im Bereich des Oberwaldes gebildet wird; und die

- **Zone der Durchgehenden Grundwassersättigung (3)**.

### Oberwaldzone (1)

Die Oberwaldzone (Abb. 6-9) besteht aus den obersten schwebenden Grundwasserstockwerken des Vogelsberges. Sie nimmt daher eine Sonderstellung im Bereich der Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke (2) ein.

In der Oberwaldzone ergänzen sich zwei Phänomene, die dazu führen, dass sich Grundwasseraustritte ( $2,8 \text{ GWA/km}^2$ ) häufen und dass diese ganzjährig schütten. Das erste ist ein gehemmter, vertikaler Grundwasserfluss, der durch Grundwasser gering leitende Schichten, die aus teilweise mächtigen Vulkaniklastika, verwitterten und damit vertonten Basallagen oder sehr kompakten und dichten Basalten bestehen, bedingt ist. Über diesen Schichten haben sich ein oder mehrere Grundwasserstockwerke ausgebildet. Bei den hohen Niederschlägen im Oberwald ist die Grundwasserneubildung höher als die Versickerung in die unterlagernde Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke. Die dadurch bedingten zahlreichen Grundwasseraustritte folgen dem Ausstreichen von Grundwasser nicht leitenden bzw. Grundwasser gering leitenden Schichten.

Das zweite Phänomen ist in der Bodenvergesellschaftung des Oberwaldes zu sehen. Die weitflächig vorherrschenden Lockerbraunerden und Parabraunerden haben eine hohe Feldkapazität. Sie speichern Niederschläge und verhindern so einen raschen ober- und unterirdischen Abfluss.

Die hohen Niederschläge haben in der Oberwaldzone zu Grundwasser beeinflussten Böden geführt. So sind neben Lockerbraunerden besonders Gleye verbreitet. Die Grundwasseraustritte führten

in den Hanglagen zu vernässten Flächen (Nassstellen), die sich bei sommerlicher Oberbodentrockenheit zu Quellgleyen und bei ganzjähriger Wassersättigung zu Hanggleyen entwickelten. Im Oberwald befinden sich ferner zwischen den Gipfeln des Taufsteins, Sieben Ahorns und Grünbergs Hochmoorbereiche, die auf ehemaligen Stagnogleyen liegen.

### Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke (2)

In der Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke (Abb. 6-9) ist die Dichte der Grundwasseraustritte deutlich geringer als in der Oberwaldzone (1). Sie liegt unter dem Mittel von  $1,2 \text{ GWA/km}^2$ . Das Blatt Schotten ( $0,7 \text{ GWA/km}^2$ ), das in der Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke liegt, ist hierfür beispielhaft. Je größer die Entfernung von der Oberwaldzone ist, desto wahrscheinlicher hat ein relativ zum Umfeld hoch gelegenes Grundwasserstockwerk ein vom Oberwald unabhängiges Einzugsgebiet (2B). Die 2B-Grundwasserstockwerke befinden sich überwiegend in den lang gestreckten basaltischen Höhenzügen, die sich zumeist radialstrahlig vom Oberwald bis in die Randbereiche des Vulkangebietes erstrecken. Die kleinflächigen Einzugsgebiete und das geringe Retentionsvermögen (Kap. 6.3.2) des klüftigen Basaltes führen zu intermittierenden Grundwasseraustritten, die stark niederschlagsabhängig sind.

Im ausgehenden Winterhalbjahr, nach einer Phase hoher Grundwasserneubildung, können 2B-Grundwasseraustritte über erhebliche Schüttungen verfügen. Mit aufkommender Vegetation und

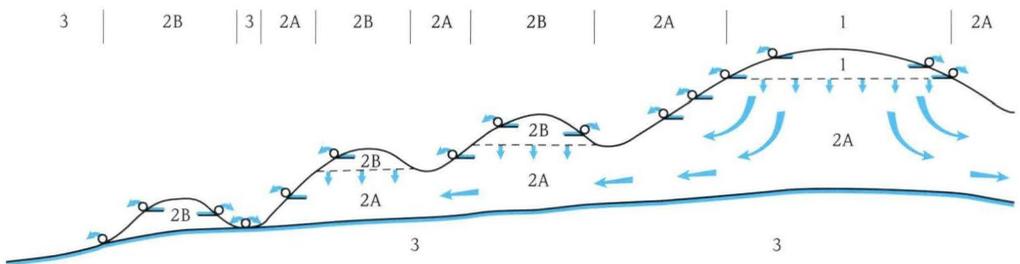


Abb. 6-9. Schematische Darstellung der hydrogeologischen Zonen des Vogelsberges (Leßmann & Wiegand 1998).

steigender Evapotranspiration im Sommerhalbjahr nimmt die Grundwasserneubildung ab oder fehlt ganz. Die Grundwasserneubildung wird dann geringer als der potenzielle Abfluss aus den betreffenden Grundwasserstockwerken (2B). Dies führt besonders in Spätsommern zum Trockenfallen der Grundwasseraustritte. Nach andauernden oder starken Niederschlägen können 2B-Grundwasseraustritte episodisch, in sehr feuchten Sommern auch ganzjährig schütten.

Bei den Grundwasseraustritten der Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke, die in tiefen Taleinschnitten liegen, kann überwiegend von einem Anschluss an den Oberwald (2A-Grundwasseraustritte) ausgegangen werden. Die 2A-Typen sind je nach Anteil des aus dem Oberwald zusickernden Grundwassers perennierend oder intermittierend. Wenn der Anteil des Grundwassers, das in der Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke gebildet wurde, gegenüber dem aus der Oberwaldzone überwiegt, ist wie bei den 2B-Grundwasseraustritten mit starken Schüttungsschwankungen zu rechnen. Bei lang anhaltenden Trockenphasen kann der Grundwasserzustrom aus dem Oberwald durch andere Faktoren, wie z.B. der Vegetation, vollständig aufgebraucht werden, so dass es ebenfalls zu einem Trockenfallen kommt.

Bei 2A-Grundwasseraustritten ist das potenzielle Einzugsgebiet um so größer, je größer die Entfernung von der Oberwaldzone ist. Die Höhe des Basisabflusses, der aus der Oberwaldzone stammt, und des kurzfristigen, niederschlagsabhängigen Abflusses kann anhand von Grundwasserstandsganglinien abgeschätzt werden (Kap. 6.4.2.4). Die Ergie-

bigkeit der Grundwasserstockwerke und damit die Höhe der Schüttung bzw. die Anzahl der Grundwasseraustritte, die zu einem Grundwasserstockwerk gehören, nimmt mit der Größe des Einzugsgebietes zu. In der Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke ist daher mit abnehmender Höhe bei den 2A-Grundwasseraustritten eine Zunahme der Grundwasseraustrittsdichte und der Einzelschüttungen zu verzeichnen.

### **Zone der Durchgehenden Grundwassersättigung (3)**

Während der Kartierung aufgenommene Grundwasseraustritte mit Schüttungen > 10 l/s sind zu meist tief gelegene 2A-Grundwasseraustritte (z.B. G.8.16, ca. 0,4 km NW Kirchbracht, CD Anl. 1) oder gehören zur Zone der Durchgehenden Grundwassersättigung (z.B. O.5.5, Ortenberg). Die Grundwasseraustritte, die zur untersten hydrogeologischen Zone des vulkanischen Vogelsberges gehören, befinden sich zumeist in Taleinschnitten und haben z.T. extreme Schüttungen. Beispiele sind u.a. die Quellgruppe BG.8.5 und die Nassstelle BG.6.28 mit einer Gesamtschüttung bzw. einem Abfluss von jeweils um 20 l/s. Da die Grundwasseraustritte der Zone der Durchgehenden Grundwassersättigung zum Teil in Form von Grundquellen den Vorflutern zutreten, ist eine exakte Lageangabe oft nicht möglich. Abflussmessungen liefern Hinweise auf die Existenz von Grundquellen. Die Verteilung der Abflusspenden spiegelt, wie die Gliederung der Grundwasseraustritte, die beschriebenen drei hydrogeologischen Zonen des vulkanischen Vogelsberges wider (Kap.8.1).

### **6.3.2 Schüttungsverhalten von Grundwasseraustritten**

Zur Klassifikation einer Quelle dienen u.a. der Auslaufkoeffizient ( $\alpha$ ), die hydrogeologische Halbwertszeit (T) und die Schüttungsquotienten.

$$Q = Q_0 \cdot e^{\alpha t} \quad [l/s]$$

$$\rightarrow \alpha = -1/t \cdot \ln(Q/Q_0) \quad [1/d]$$

mit Q: Abflussmenge [l/s] nach der Zeit t,  
 $Q_0$ : anfängliche Abflussmenge [l/s],

t: Zeit [d] zwischen den Abflussmessungen für  $Q_0$  und Q,  
 $\alpha$ : Auslaufkoeffizient, quellspezifische Konstante [1/d].

Der Auslaufkoeffizient ( $\alpha$ ) ist eine quellspezifische Konstante, deren Berechnung auf der Überlegung beruht, dass ein vollkommen homogener und isotroper Grundwasserleiter durch eine Quelle kon-

tinuierlich entleert wird (Maillet 1905). Die Schüttung folgt dabei einer Exponentialfunktion, wobei die Geschwindigkeit der Schüttungsabnahme durch die hydraulischen Eigenschaften des Wasser leitenden und speichernden Mediums vorgegeben ist. Je kleiner der Auslaufkoeffizient, desto größer ist das Retentionsvermögen des Gesteins. Bei einer langsamen Entleerung des Speichers ist der Koeffizient klein und die Schüttungsganglinie flach. Da es in der Natur in den seltensten Fällen homogene und isotrope Grundwasserleiter gibt, ist eine Beschreibung des hydraulischen Systems bei der Interpretation von Auslaufkoeffizienten erforderlich. In Poren- und Kluftgrundwasserleitern können unterschiedliche hydraulische Wertigkeiten (Mehrfachporositäten) vorliegen, die durch die Reihung verschiedener Exponentialfunktionen in zeitlicher Folge angenähert werden.

$$T = \ln 2 / \alpha \quad [d]$$

mit T: hydrogeologische Halbwertszeit [d],  
 $\alpha$ : Auslaufkoeffizient, quellspezifische Konstante [1/d].

Die hydrogeologische Halbwertszeit (T) einer Quelle wird aus ihrem Auslaufkoeffizienten ( $\alpha$ ) berechnet. Es handelt sich dabei um die Zeitspanne, in der die Schüttung auf die Hälfte ihres ursprünglichen Wertes zurückgegangen ist. Die hydrogeologische Halbwertszeit (T) ist keine Angabe zum Wasseralter oder zur Verweilzeit des Wassers in einem Grundwasserleiter, sondern lediglich eine anschauliche Größe bei der Darstellung des quellspezifischen Auslaufkoeffizienten ( $\alpha$ ), daher gelten für T dieselben Interpretationskriterien wie für  $\alpha$ .

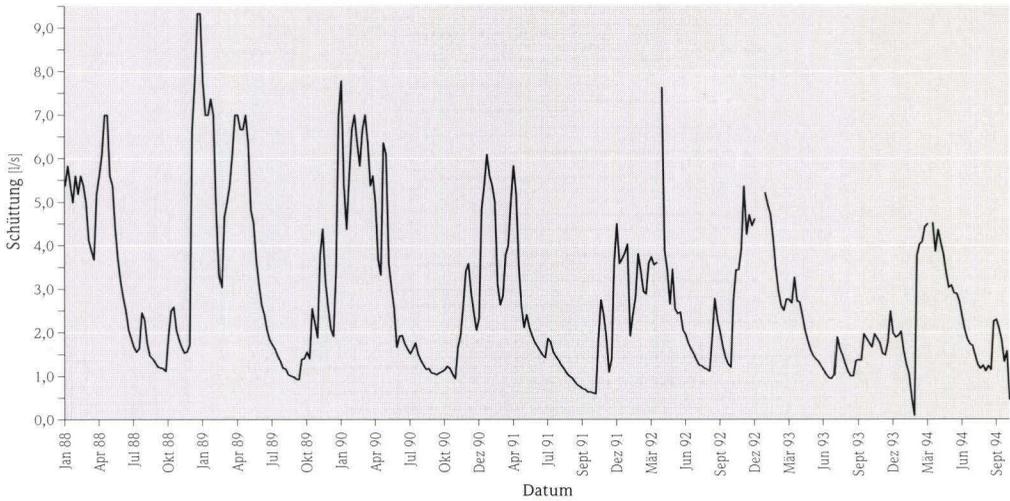
Die Schüttungsquotienten (z.B. NQ : HQ) einer Quelle resultieren aus einer statistischen Auswertung der Schüttung. Sie bieten die Möglichkeit, Rückschlüsse über die hydrogeologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet zu ziehen. Niedrige Schüttungsquotienten zeigen ein geringes Retentionsvermögen und damit ein schnelles Leerlaufen des Speichers an.

Die Hoherodskopfquelle bei Breungeshain, ca. 400 m nördlich des Gipfels, ist für die Grundwasseraustritte der Oberwaldzone beispielhaft. Sie

weist ein stark niederschlagsabhängiges Abflussverhalten auf, das von großen Schüttungen in den Wintermonaten und geringen Schüttungen in den Sommermonaten geprägt ist (Abb. 6-10).

Aus Sicht der Niederschlagsverteilung ist der Hohe Vogelsberg ein Mittelgebirgstyp mit dem Hauptmaximum des Niederschlags im Winter und einem breiten Nebenmaximum in den Sommermonaten (Kap. 2.2). Die Niederschlagsverteilung im Winterhalbjahr spiegelt sich deutlich im Schüttungsverhalten der Hoherodskopfquelle wider. Niederschläge wirken sich umgehend auf die Schüttung aus. Die im Oberwald teilweise erheblichen Niederschläge während des Sommerhalbjahres sind jedoch kaum in der Schüttungsganglinie der Quelle zu erkennen, da es durch die im Sommer hohe potenzielle Evapotranspiration, deren Wert größer als der Niederschlag ist, nur vereinzelt zur Neubildung von Grundwasser kommt. Einzelne Stark- und Dauerereignisse führen jedoch auch während dieser Periode zur Versickerung von Wasser und damit zu einem Anstieg der Quellschüttung.

Die Schüttungsganglinie charakterisiert durch ihren Verlauf das hydrologische Verhalten des Grundwasserkörpers. Die vulkanischen Gesteine des Oberwaldes – besonders anschaulich im Bereich der Hoherodskopfquelle – sind gut bis sehr gut geklüftete Grundwasserleiter, die über ein geringes Retentionsvermögen verfügen. Die steile Quellschüttungsganglinie zeigt dieses deutlich. Die Grundwasserneubildung hängt dabei besonders im Winterhalbjahr direkt vom Niederschlag ab. Monate mit unter dem Mittel liegenden Niederschlägen führen, selbst in Jahreszeiten eigentlich hoher Grundwasserneubildung, zum fast völligen Verbrauch des Grundwasservorrates. Im Februar 1994 wurde der NQ-Wert der Hoherodskopfquelle für den Zeitraum zwischen den Jahren 1988 und 1994 mit 0,1 l/s während eines im Mittel unterdurchschnittlich feuchten Winterhalbjahres registriert. Der HQ-Wert wurde in der zweiten Dezemberhälfte des Jahres 1988 mit 9,3 l/s gemessen. Der sehr niedrige Schüttungsquotient von NQ : HQ (0,01) weist Karstcharakter auf und lässt auf einen gleichmäßig sehr gut geklüfteten Grundwasserleiter, der aus einem hohen Anteil von Blockschutt bestehen kann, schließen. Die hydrogeologische Halbwerts-



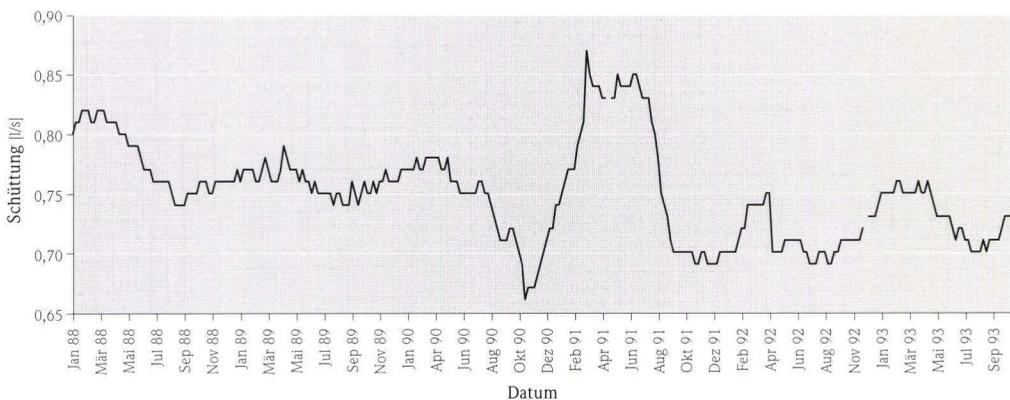
**Abb. 6-10.** Hoherodskopfquelle, 1,5 km nordöstlich Breungeshain, Landesgrundwasserdienstmessstelle 461502, WSG NR. 11.114 (R 351611, H 559772).

zeit (T) von 55 Tagen bei einem Auslaufkoeffizienten von  $\alpha = 0,0125 \text{ d}^{-1}$  belegt dies zusätzlich.

Die Heegholzquelle am westlichen Ortsrand von Ilbeshausen zeigt eine sehr viel ausgeglichenerer Quellschüttungsganglinie (Abb. 6-11). Sie befindet sich auf der Ostseite des Vogelsberges im Lee des Oberwaldes. Die Quelle liegt in der Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke. Die Schüttung schwankt im Mittel um 0,8 l/s und erreicht für den Zeitraum zwischen den Jahren 1988 und

1994 am 11.09.1991 mit 0,9 l/s ihren HQ-Wert sowie am 22.11.1990 mit 0,66 l/s ihren NQ-Wert. Der Schüttungsquotient zwischen NQ : HQ liegt bei 0,8. Die hydrogeologische Halbwertszeit (T) beträgt 275 Tage ( $\alpha = 0,0025 \text{ d}^{-1}$ ). Eine Niederschlagsabhängigkeit lässt sich nur in den Spitzen erkennen.

Der Basisanteil des Wassers stammt offensichtlich aus der im Oberwald stattfindenden Grundwasserneubildung. Die Quelle gehört damit zu einem



**Abb. 6-11.** Heegholzquelle, am südwestlichen Ortsrand Ilbeshausen, Landesgrundwasserdienstmessstelle 461503, WSG Nr. 11.063 (R 352199, H 559764).

2A-Grundwasserstockwerk in der Zone der Schwelenden Grundwasserstockwerke. Das Grundwasser sickert aus der Oberwaldzone kontinuierlich in die unterlagernden Gesteinsschichten. Ist die Menge des zusickernden Wassers über einer gering leitenden Gesteinsschicht größer als die Menge, die diese durchsickern kann, bilden sich Grundwasserkörper aus. Im Bereich des Erosionsniveaus der Grundwasser gering leitenden Schicht kommt es zu Grundwasseraustritten. Diese verfügen über eine relativ konstante Schüttung, wenn der Hauptanteil der Schüttung nicht aus dem Interflow oder aus dem im direkten oberirdischen Einzugsgebiet der Quelle gebildeten Grundwasser stammt, sondern durch den Grundwasserzufluss aus der Oberwaldzone reguliert wird. Durch die Nähe zum Oberwald wirken sich Monate mit unter bzw. über dem Mittel liegender Grundwasserneubildung auf das Schüttungsverhalten aus. Die Schüttungsschwankungen sind jedoch im Vergleich zur Hoherodskopfquelle als äußerst gering einzustufen.

Die Quelle Sichenhausen (Abb. 6-12), ca. 1,0 km südlich des Ortes, ist ein Übergangstyp zwischen der Hoherodskopfquelle (Abb. 6-10) und der Heegholzquelle (Abb. 6-11). Der Basisabfluss

der Quellschüttung stammt aus dem kontinuierlichen Grundwasserzufluss des Oberwaldes (2A-Grundwasseraustritt). Jedoch ist zusätzlich eine starke Abhängigkeit von den Niederschlägen zu beobachten. Der Anteil des Basisgrundwasserzuflusses aus dem Oberwald wird, ähnlich wie bei der Heegholzquelle, auf ca. 0,7 l/s beziffert. Die Quellschüttungsganglinie zeigt, dass das vulkanische Gestein im unterirdischen Einzugsgebiet der Quelle Sichenhausen über gleiche hydrologische Eigenschaften wie das der Hoherodskopfquelle verfügt. Die hydrogeologische Halbwertszeit (T) liegt ebenfalls bei 55 Tagen ( $\alpha = 0,0127 \text{ d}^{-1}$ ). Das Retentionsvermögen ist gering einzustufen. Die Basisschüttung der Quelle wird weniger durch die Struktur des Gesteins als durch die Menge des Grundwassers bestimmt, das aus überlagernden Gesteinsschichten der Quelle zusickert. Die Exposition der Quelle Sichenhausen ist gegenüber der Lage des Oberwaldes weniger den Niederschlägen ausgesetzt, so dass im Vergleich zur Hoherodskopfquelle keine so extremen Schüttungsschwankungen auftreten. Demgegenüber ist das oberirdische Einzugsgebiet der Quelle Sichenhausen erheblich größer als das der Heegholzquelle; ein

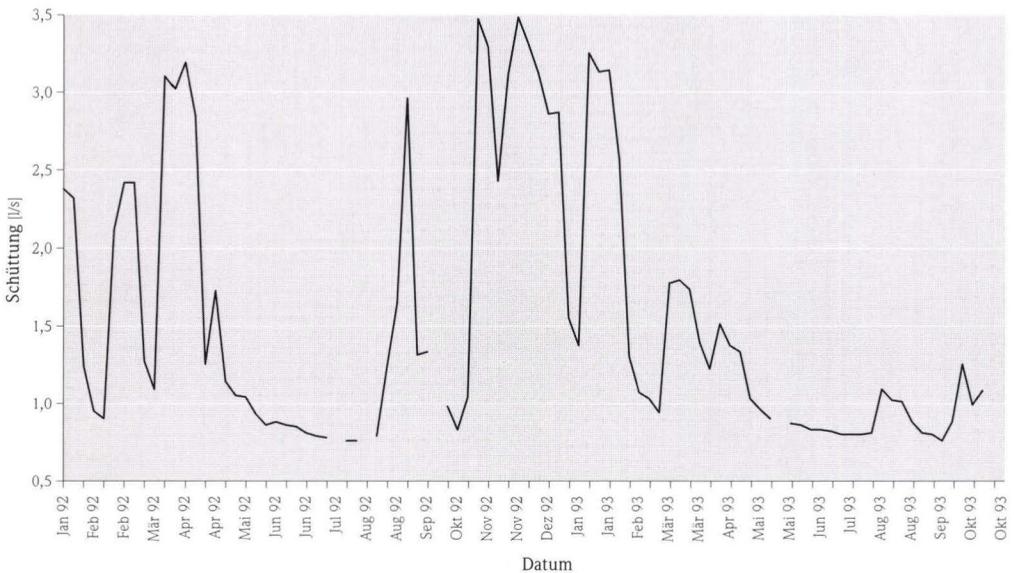


Abb. 6-12. Quelle Sichenhausen, Landesgrundwasserdienstmessstelle 486518, WSG Nr. 11.029 (R 351732, H 559259).

größerer Interflowanteil und ein höherer Anteil von im oberirdischen Einzugsgebiet der Quelle gebildetem Grundwasser und damit größere Schüttungsschwankungen sind die Folge. Der Anteil der beiden letztgenannten Faktoren kann bei der Quelle Sichenhausen auf das 5-fache des Grundwasserbasisabflusses ansteigen.

## 6.4 Grundwasserstockwerksbau

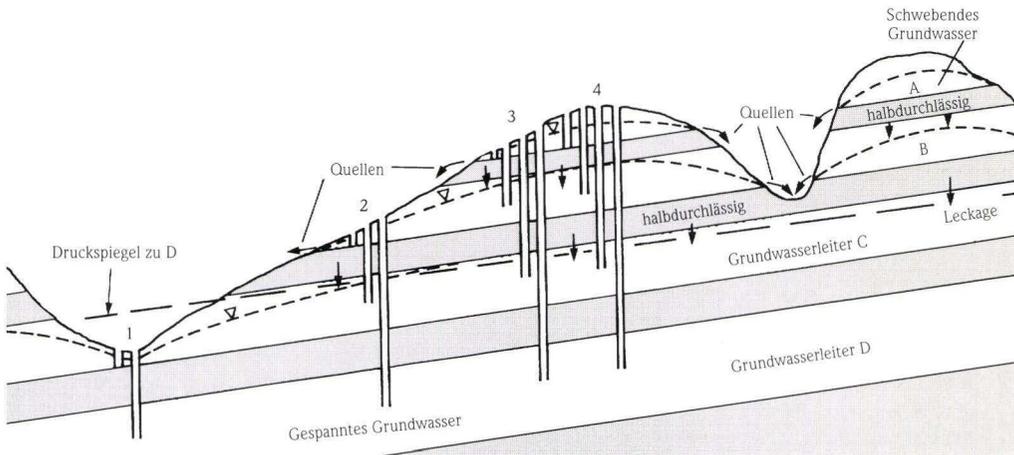
### 6.4.1 Grundwasserstockwerke

Der vulkanische Vogelsberg besteht aus einer Wechselfolge von Grundwasser leitenden mit Grundwasser gering bzw. nicht leitenden Gesteinschichten (Kap. 6.4.2.1). Abb. 6-13 zeigt die Schwierigkeiten der sich daraus ergebenden hydrogeologischen Interpretation. In einer Bohrung können unterschiedliche Grundwasserpotenziale angetroffen werden, die mit fortschreitender Bohrtiefe zu einem extrem stark schwankenden Grundwasserspiegel im Bohrloch führen. Das Grundwasser kann je nach Bohrtiefe schwebend, frei oder ge-

Die Heegholzquelle und die Quelle Sichenhausen zeigen anschaulich, dass in der Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke mit zunehmender Entfernung des Grundwasseraustrittes von der Oberwaldzone der Einfluss des im Oberwald gebildeten Grundwassers auf das Schüttungsverhalten einer Quelle abnimmt.

spannt sein. Zudem überlagern sich verschiedene Grundwasserpotenziale; es stellen sich Ausgleichs- bzw. Mischwasserspiegel ein.

In Abb. 6-13 sind Brunnenester (= Mehrfachmessstellen) dargestellt. Jede Messstelle ist einer Grundwasseroberfläche und damit einem Grundwasserleiter zugeordnet. Die hydrogeologische und hydraulische Interpretation der geologischen Abfolge ist bei einem derartigen Grundwasserstockwerksbau jedoch äußerst problematisch (Kap. 6.4.2). Beispielsweise liegt der Grundwasserspie-



**Abb. 6-13.** Schematische Darstellung von schwebenden, gespannten und ungespannten Grundwasservorkommen. Brunnenest 1 trifft im Grundwasserleiter C freies und im Grundwasserleiter D gespanntes Grundwasser, Brunnenest 2 im Grundwasserleiter B schwebendes Grundwasser, im Grundwasserleiter C freies und im Grundwasserleiter D gespanntes Grundwasser, Brunnenest 3 im Grundwasserleiter A schwebendes Grundwasser, im Grundwasserleiter B freies und im Grundwasserleiter C und D gespanntes Grundwasser an, schließlich Brunnenest 4 mit Ausnahme von A in allen Grundwasserleitern gespanntes Grundwasser (zitiert aus Mattheß & Ubell 1983, nach Brown et al. 1975 und Davis & DeWiest 1967).

gel bei der Bohrung der tiefsten Grundwassermessstelle des Brunnennestes 4 während des gesamten Bohrvorganges im Niveau des obersten Grundwasserstockwerkes A. Erst bei einem gezielten Ausbau der Grundwassermessstelle und damit einer Abdichtung zu den Grundwasserleitern A, B und C sowie der ausschließlichen Verfilterung im Grundwasserleiter D stellt sich der Grundwasserspiegel in der Messstelle auf den Druckspiegel D ein. Der hydrogeologische Grundwasserstockwerksbau ist allein aufgrund von Schichtenprofilen nicht zu erkennen.

Für eine Positionsanalyse, also der Zuordnung eines Grundwasserspiegels zu einem oder mehreren Grundwasserstockwerken, müssen im Vogelsberg mehrere Informationsebenen vorhanden sein:

- Grundwasseraustrittskartierung (Kap. 6.3.1, Kap. 5.2.1),
- Schüttungsganglinien (Kap. 6.3.2),
- Abfolge der geologischen Schichten (Kap. 6.4.2),
- Grundwasserstände während des Bohrvorganges (Kap. 6.4.2.1),
- geophysikalische Bohrlochlogs (Kap. 6.4.2.2),
- geohydraulische Pumpversuche (Kap. 6.4.2.3),
- langjährige Grundwasserganglinien (Kap. 6.4.2.4),
- Ausbau von Grundwassermessstellen (Kap. 6.4.2).

Grundwasseraustritte folgen im Vogelsberg häufig den Ausbissbereichen von Grundwassernichtleitern (Kap. 6.3.1). Sie bilden in Hanglagen vielfach Quelllinien, die sich einzelnen Grundwasserstockwerken zuordnen lassen. Im Auenbereich bieten Nass- und Feuchtgebiete sowie Abflussmessungen, die zusätzlich Aufschluss über Grundquellen und Schwinden geben, weitere wichtige Hinweise auf die Existenz von Grundwasserstockwerken (Kap. 8.1).

Kenntnisse über die geologische Schichtenfolge und über den Ausbau einer Grundwassermessstelle sind Voraussetzungen für eine Positionsanalyse. Wasserstandsmessungen während des Bohrvorganges, geophysikalische Bohrlochmessmethoden und geohydraulische Pumpversuche liefern weiterhin Informationen über wasserführende Gesteinsschichten und deren Ergiebigkeiten (Kap. 6.4.2). Dies trifft ebenfalls auf langjährige Grundwasser-

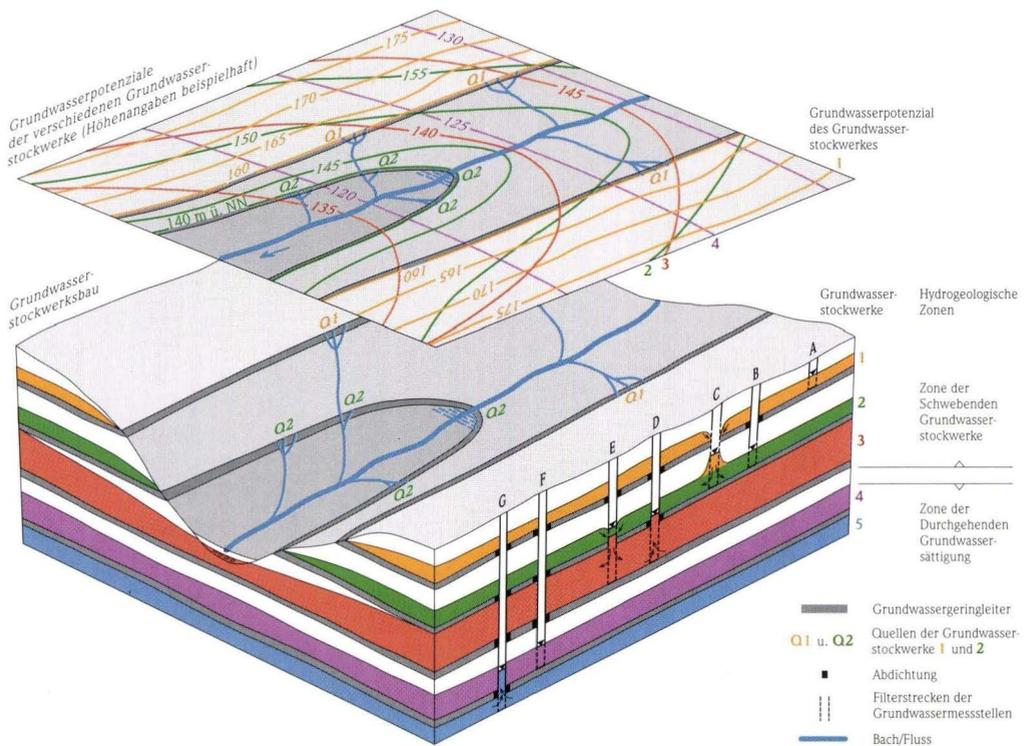
ganglinien zu, die es ermöglichen, Aussagen über etwaige Grundwasserstockwerke und damit über den durch eine Bohrung aufgeschlossenen Grundwasserstockwerksbau zu treffen (Kap. 6.4.2.4). Zusätzlich sind hydraulische Interpretationen möglich.

Abb. 6-14 bietet eine vereinfachte schematische Darstellung der verschiedenen Informationsebenen und zeigt deren Zusammenhänge auf. Die Grundwassermessstellen A bis E zeigen für die Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke mögliche Grundwasserspiegel bei unterschiedlichen hydraulischen Bedingungen. Die Grundwassermessstelle A steht mit einem vollkommenen Ausbau im Grundwasserstockwerk 1, das im Talanschnitt über mehrere Quellen (Q1) verfügt. Die Grundwasserpotenziale dieses Grundwasserstockwerkes haben sich auf das Tal eingestellt. Ihre Grundwassergleichen verlaufen daher parallel zur Talachse.

Die Grundwassermessstelle B ist im Grundwasserstockwerk 2 verfiltert. Sie ist zum höheren Grundwasserstockwerk 1 abgedichtet. Der Grundwasserspiegel in der Grundwassermessstelle B entspricht der Grundwasseroberfläche des Grundwasserstockwerkes 2. Der vernässte Bereich in der Talau und die Quellen (Q2) im unteren Hang werden vom Grundwasserstockwerk 2 gespeist.

Die Grundwassermessstelle C verfügt über einen Ausgleichwasserspiegel zwischen den Grundwasserstockwerken 1 und 2, da sie in beiden Grundwasserstockwerken verfiltert ist. Die Höhe des Ausgleichwasserspiegels ist abhängig von den hydraulischen Kenngrößen der beiden Grundwasserleiter (Kap. 6.4.2.4). Während die Grundwasseroberfläche des Grundwasserstockwerkes 1 lokal absinkt, kommt es im Grundwasserstockwerk 2 zu einer Grundwassererhöhung.

Die Grundwasserdruckfläche des Grundwasserstockwerkes 3 liegt zum Teil oberhalb der Grundwassersohlfäche des Grundwasserstockwerkes 2 (Grundwassermessstelle D), so dass ein gespannter Zustand vorhanden ist. Die Grundwassermessstelle E ist in beiden Grundwasserstockwerken (2+3) verfiltert; sie zeigt einen Grundwasserspiegel, der im oberen Grundwasserstockwerk (2) liegt. Durch das höhere Potenzial des Grundwasserstockwerkes 2 gegenüber dem des Grundwasserstockwerkes 3 ist die Wasserbewegung in der Grundwassermess-



**Abb. 6-14.** Schematisches hydrogeologisches Blockbild eines mehrschichtigen Kluftgrundwasserleitersystems (Leßmann & Wiegand 1998).

stelle E nach unten gerichtet. Der Grundwasserspiegel liegt unterhalb der Grundwasser Oberfläche des Grundwasserstockwerkes 2.

Die Grundwassermessstellen F und G gehören zur Zone der Durchgehenden Grundwassersättigung, ab der keine wasserungesättigten Gesteinspartien mehr vorkommen, jedoch eine Grundwasserstockwerksgliederung (4+5) weiterhin vorhanden ist. Das Grundwasserstockwerk 4 ist im Beispiel das höchste Grundwasserstockwerk dieser hydrogeologischen Zone. Die Grundwasser Oberfläche des Grundwasserstockwerkes 4 liegt unterhalb des Tales. Die dazugehörigen Grundwasserpotenziale (4) werden daher in ihrem Verlauf durch das Tal nicht beeinflusst. Die Grundwasserfließrichtung (4) verläuft parallel zur Talachse und damit senkrecht zur Fließrichtung des Grundwasserstockwerkes 1. Die Potenziale der Grundwasser-

stockwerke 2 und 3 werden unterschiedlich stark durch den Taleinschnitt beeinflusst. Sie stellen in ihrem Verlauf einen Übergang zwischen den Potenzialen der Grundwasserstockwerke 1 und 4 dar.

Erst das Zusammentragen und Abwägen aller oben genannten und in Abb. 6-14 schematisch dargestellten Informationsebenen ermöglichte es im Vogelsberg, ein räumliches Modell der hydrogeologischen und hydraulischen Situation zu erstellen. Die Darstellung erfolgte mittels einer Grundwassergleichenkarte (s. Übersicht Abb. 6-15, Ausschnitte Abb. 6-16 bis 6-22 und CD Anl. 2). Da sich im Vogelsberg die hydraulischen Konstellationen kurzfristig ändern, wurde eine auf eine enge Zeitspanne (September 1994 + Ergänzungen) bezogene Darstellung vorgenommen. Für diese Zeitspanne wurden alle verfügbaren Informationsebenen zusammengetragen und ausgewertet.

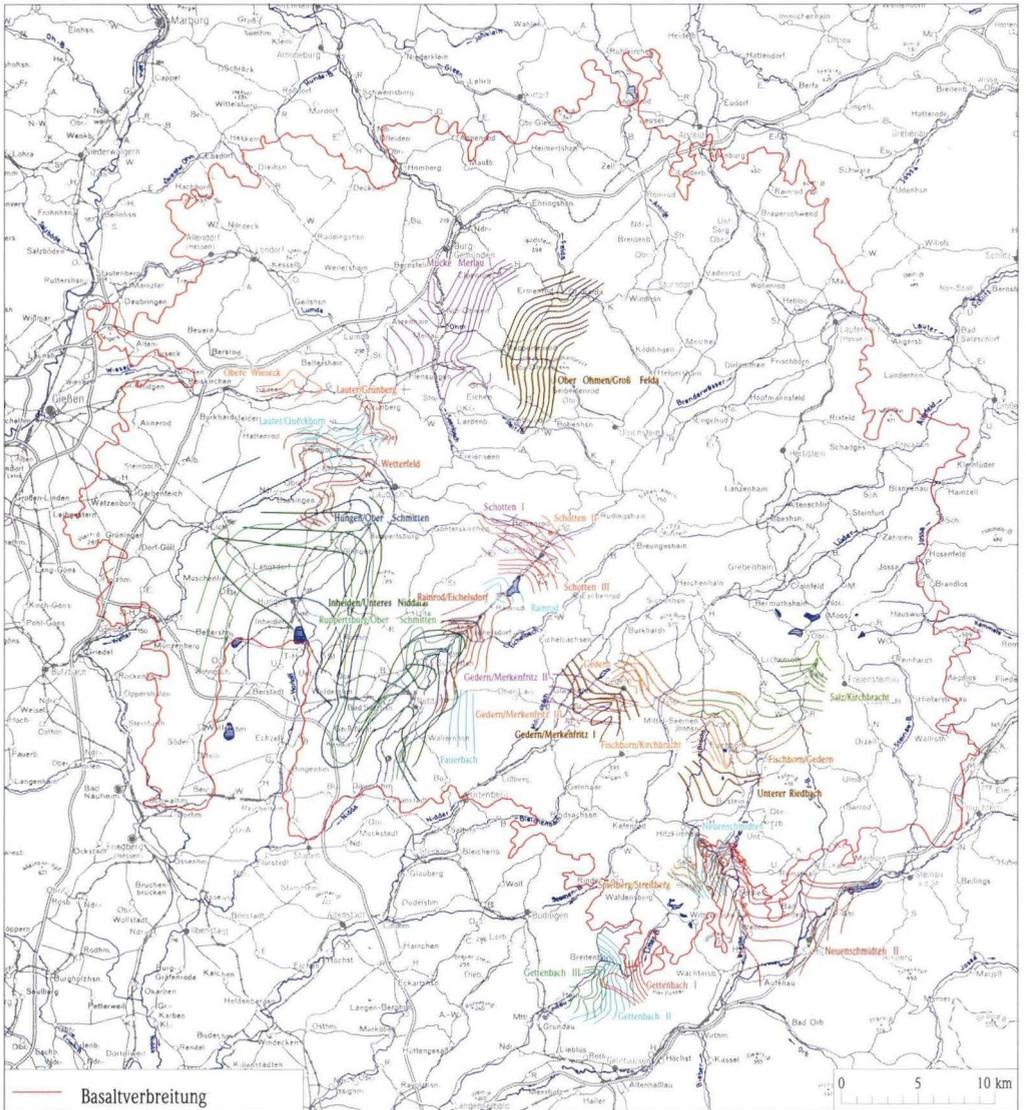


Abb. 6-15. Grundwasserpotenziale, Teilausschnitte 1 bis 7 siehe Abb. 6-16. bis 6-22.

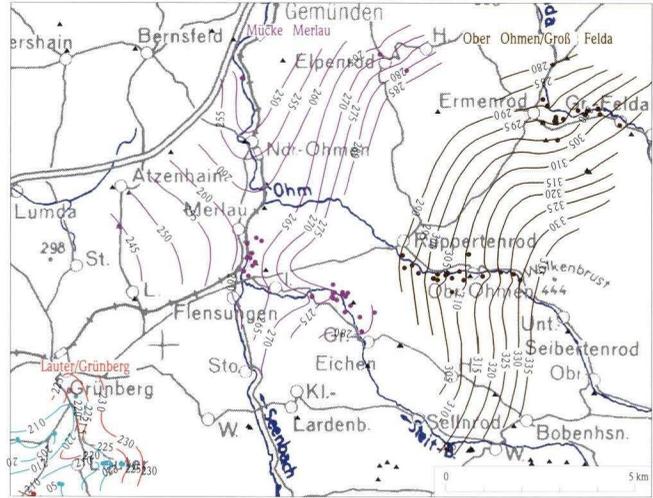


Abb. 6-16. Grundwasserpotenziale, Teilausschnitt 1.

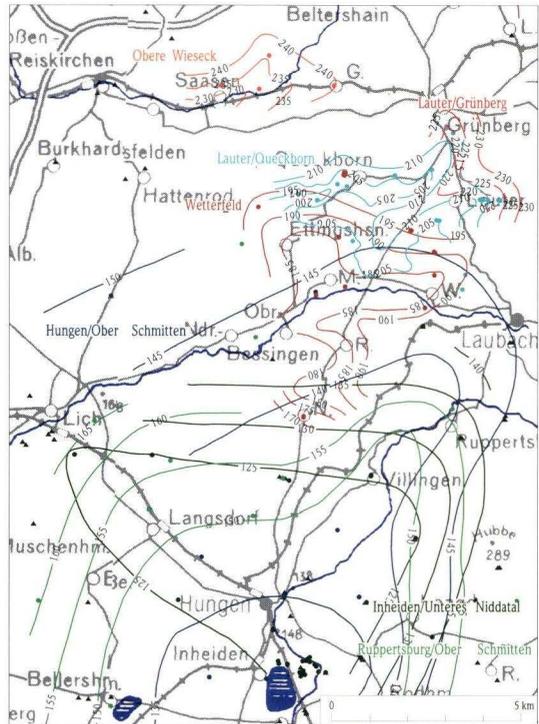
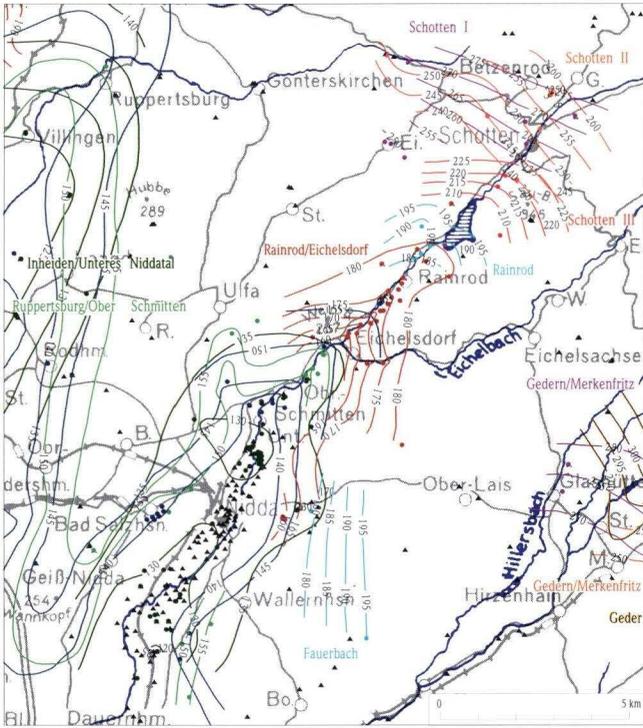
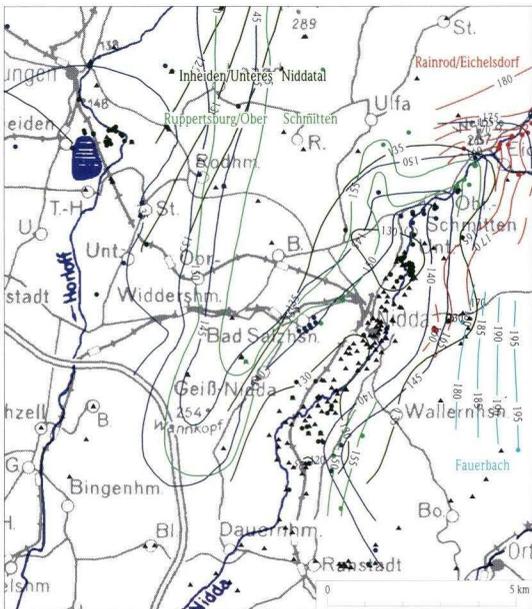


Abb. 6-17. Grundwasserpotenziale, Teilausschnitt 2.



**Abb. 6-18.** Grundwasserpotenziale, Teilausschnitt 3.



**Abb. 6-19.** Grundwasserpotenziale, Teilausschnitt 4.

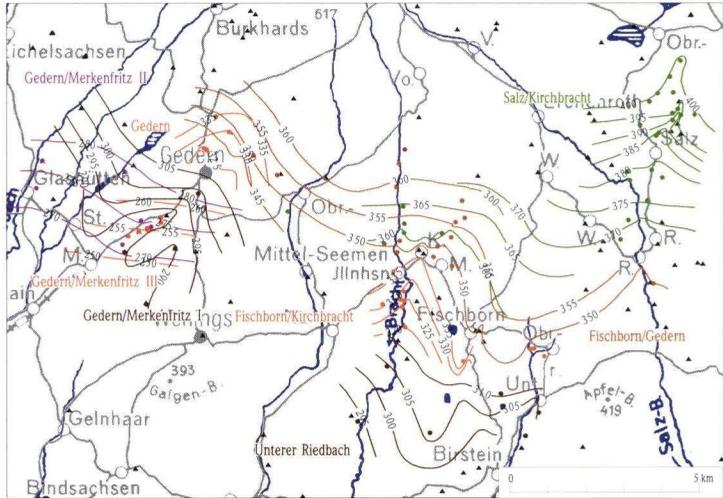


Abb. 6-20. Grundwasserpotenziale, Teilausschnitt 5.

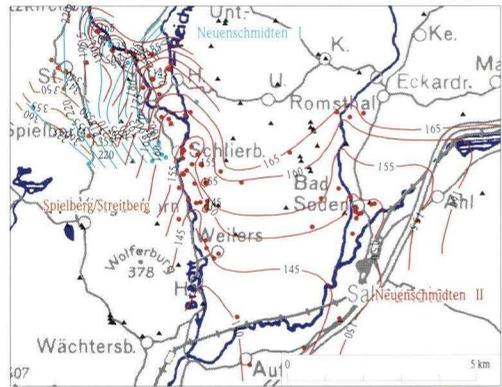


Abb. 6-21. Grundwasserpotenziale, Teilausschnitt 6.

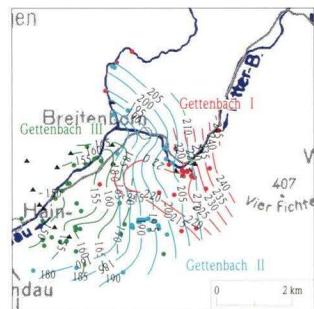


Abb. 6-22. Grundwasserpotenziale, Teilausschnitt 7.

## 6.4.2 Bohrungen

### 6.4.2.1 Forschungsbohrung Ulrichstein

Der Bohrpunkt der Forschungsbohrung Ulrichstein liegt ca. 3 km südöstlich der Stadt Ulrichstein im nördlichen Bereich des Oberwaldes in einer Höhe von ca. 669 m ü. NN. Die Bohrung wurde aus Mitteln der Geowissenschaftlichen Gemeinschaftsaufgaben (GGA), Hannover, des HfB und der Stadt Ulrichstein, die den oberen Teil der Bohrung als Wassergewinnungsanlage nutzen will, finanziert (Hoppe & Schulz 1997, 2001).

Aus hydrogeologischer Sicht können Bohrungen und deren mögliche spätere Nutzungsarten als Wassergewinnungsanlage oder als Grundwassermessstelle in einem mehrschichtigen Kluffundwasserleitersystem Erkenntnisse zur hydrogeologischen Grundwasserstockwerksgliederung, zu den hydraulischen Kenngrößen der einzelnen Grundwasserstockwerke, zu hydraulischen Kontakten zwischen den Grundwasserstockwerken, zu den Grundwasserständen bzw. Grundwasserpotenzialflächen der Grundwasserstockwerke, zur Grundwasserbeschaffenheit, zum Einzugsgebiet und zur hydraulischen Anbindung an oberirdische Gewässer liefern. Hydrogeologische Fragestellungen spielten jedoch bei der Konzeptionierung der Forschungsbohrung Ulrichstein aus unterschiedlichen Gründen eine untergeordnete Rolle.

Der Bohrkern (Ehrenberg et al. 2001) zeigt eine Abfolge von zumeist basanitischen und alkaliolivinbasaltischen Lavaströmen. In geringerem Umfang kommen tholeiitische, hawaiitische und shoshonitische Lavaströme sowie ein fast 88 m mächtiger Trachyt vor, der zwischen 286,1 m u. GOK und 373,9 m u. GOK durchbohrt wurde. Die Basanite sind bei den magmatischen Gesteinen mit einem Anteil von über 30% an der Gesamtfolge am häufigsten vorhanden. Die Alkaliolivinbasalte nehmen dagegen mit ca. 10% eine deutlich untergeordnete Stellung ein. Vulkanologisch besonders interessant ist ein 13,40 m mächtiger Composite-Lava-Flow bei 450 m u. GOK aus Latit (unten) und Hawaiiit (oben).

Den Vulkaniten sind teilweise mächtige Vulkaniklastite („Tuffe“) zwischengeschaltet, die insgesamt rd. 44% der durchteuften Abfolge ausmachen. Da-

bei wurden in Korngröße und Genese unterschiedliche vulkaniklastische Ablagerungen festgestellt: primäre Fallablagerungen (Aschen- und Lapillituffe, Schlackenagglomerate) und Massenstromablagerungen (Schlamm- und Schuttströme). Die Gesamtmächtigkeit der verschiedenen vulkaniklastischen Folgen ergibt etwa 255 m; die mächtigste Abfolge liegt an der Basis und erreicht annähernd 70 m.

Fast während des gesamten Bohrvorganges stellten sich mit unterschiedlichen Teufen verschiedene Wasserspiegelhöhen im Bohrloch ein. Bei einer Bohrteufe von 7 m wurde der erste Grundwasserspiegel bei 3,82 m u. GOK eingemessen, der jedoch nach wenigen Metern Bohrfortschritt schlagartig nach unten abfiel. Die wechselnden hydrologischen Situationen im Bohrloch führten dazu, dass beim durchgeführten Kernbohrverfahren über die gesamte Teufe große Mengen Fremdwasser als Spülung, z.T. mit Zusätzen, durch die eine Minderung der Wasserwegsamkeiten erreicht werden sollte, eingesetzt wurden. Außer auf den obersten Metern wurden über fast die gesamte Bohrstrecke totale Spülungsverluste beobachtet. Die Verluste pendelten um 10 m<sup>3</sup>/h ein. Zwischen der Bohrteufe von 75 m u. GOK bis 80 m u. GOK lag der Wert noch deutlich darüber.

Das Einmessen des Wasserspiegels mit einem Lichtlot führte bei Wiederholungsmessungen immer wieder zu Abweichungen zwischen den einzelnen Messwerten. Am Bohrloch war ferner deutliches Rauschen von Wasser zu hören, welches aus den oberen Bereichen der durch die Bohrung angeschnittenen wasserführenden vulkanischen Gesteine in das tiefere Bohrloch strömte. Die Menge dieses Wassers war so erheblich, dass das Lichtlot teilweise Werte anzeigte, die nicht dem Wasserspiegel entsprachen. Das war insbesondere dann der Fall, wenn die Messsonde des Lichtlotes die Bohrlochwand, an der Wasser nach unten floss, berührte. Verlässliche Angaben über die Wasserspiegelhöhe im Bohrloch der Forschungsbohrung lieferten unterhalb einer Teufe von etwa 50 m u. GOK nur noch die geophysikalischen Bohrlochlogs, so z.B. zur Salinität, und die Kamerabefahrung.

Am 18.06.1996 sowie am 26./27.06.1996 wurde mittels geophysikalischer Messsonden der Wasserspiegel bei 184 m u. GOK (ca. 485 m ü. NN) festgestellt. Die Lichtlotmessungen zu diesen Zeitpunkten lagen bis zu 100 m über diesem tatsächlichen Wasserspiegel. Bei der etwa vier Monate später am 04.11.1996 durchgeführten Kamerabefahrung war der Wasserspiegel auf 116 m u. GOK (ca. 553 m ü. NN) angestiegen. Der Anstieg des Wasserspiegels wird durch das aus den oberen Bereichen zufließende Grundwasser erklärt. Der Zufluss dieses Wassers ist dabei größer als die Menge an Wasser, die unterhalb des Wasserspiegels aufgrund des durch die Wassersäule im Bohrloch ausgeübten Wasserdruckes an unterlagernde Schichten abgegeben wird. Dies führt so lange zu einem kontinuierlich steigenden Wasserspiegel, bis ein Gleichwasserspiegel zwischen den betroffenen Grundwasserpotenzialen erreicht ist. Wenn die Menge an zulaufendem Wasser größer ist als die Menge an schwindendem Wasser, steigt der Wasserspiegel bis auf die Höhe des obersten Grundwasserpotenzials an. Ob zum Zeitpunkt der Kamerabefahrung ausgeglichene Verhältnisse vorherrschten, kann nicht gesagt werden, da der Beobachtungszeitraum zu gering war, um einen Anstieg des Wasserspiegels festzustellen. Über die gesamte Betrachtungsstrecke unterhalb des Wasserspiegels von 116,0 m u. GOK bis 246,5 m u. GOK war jedoch eine durch einen Partikelfluss deutlich erkennbare, nach unten gerichtete Wasserbewegung zu beobachten.

Hydrogeologische Untersuchungen an der Forschungsbohrung beschränkten sich nur auf wenige Abschnitte des Bohrprofils. Flowmeter-Messungen liegen bei einer Gesamtteufe von 657 m (Bohrkerne bis 656,5 m) über eine Länge von 102 m vor. Die Messstrecke befindet sich zwischen 186 m u. GOK (ca. 483 m ü. NN) und 288 m u. GOK (ca. 381 m ü. NN). Eine weiterreichende Befahrung mit dem Flowmeter war aus technischen Gründen nicht möglich. Für die Strecke von GOK bis 246,5 m u. GOK wurde eine Kamerabefahrung durchgeführt.

Die Kamerabefahrung erbrachte bis zu einer Teufe von 58,2 m u. GOK die in Tab. 6-1 dargestellten Ergebnisse. Danach umspülte das im Bohrloch nach unten fallende Wasser die Kamera so

stark, dass eine weiter gehende Untersuchung im tiefer liegenden Bereich bis zum Wasserspiegel nicht möglich war. Erst unterhalb des Wasserspiegels wurden wieder Beobachtungen durchgeführt. Diese lassen jedoch keine Rückschlüsse über eventuelle Grundwasserzutritte in das Bohrloch zu. Zwischen 154,5 m u. GOK und 156,5 m u. GOK, zwischen 183,7 m u. GOK und 185,0 m u. GOK sowie zwischen 236,4 m u. GOK und 237,0 m u. GOK lagen starke Bruchzonen. Sie befinden sich am Übergang zwischen basaltischen Lavaströmen, im Bereich der Topbrekzie eines hawaiitischen Lavastroms unter einer 0,5 m mächtigen Vulkaniklastitfolge bzw. in einer sehr heterogen aufgebauten Umlagerungszone. Dies kann als Hinweis für teilweise gute Klüftigkeiten in Bereichen von Top- bzw. Basisbrekzien von Lavaströmen sowie in Umlagerungszone gedeutet werden.

Die Wassertemperatur betrug beim Eintritt der Kamera in die Wassersäule 5,7°C. Bei 246,5 m u. GOK am Ende der Messstrecke war der Wert auf 6,1°C angestiegen. Dies ist als Indiz für den Zutritt von tiefem, entsprechend dem geothermischen Gradienten höher temperiertem Grundwasser in das Bohrloch zu werten. Der geringe Anstieg der Temperatur zeigt jedoch, dass in diesem Abschnitt der Bohrung der Einfluss des nach unten gerichteten Wasserflusses von oberflächennahem Grundwasser gegenüber tiefem Grundwasser deutlich überwiegt.

Im oberen Teilabschnitt bis 58,2 m u. GOK waren durch die Kamerabefahrung in zehn Bereichen mehr oder weniger starke Grundwasserzutritte im offenen Bohrloch zu beobachten. Hiervon lagen sechs in den Topbrekzien der hier vorherrschenden basanitischen Lavaströme. Bei den starken Grundwasserzutritten waren stets Topbrekzien betroffen. Wenn in der Ausdehnung von Kernzonen der Lavaströme Wasserzutritte bemerkt wurden, war das Gestein zumeist mit Blasen durchsetzt. Diese erreichten Größen von einigen Millimetern bis zu Dezimetern.

Nur in einem Fall sind die Wasserzutritte offensichtlich nicht auf die guten Wasserwegsamkeiten des Wasser führenden Gesteins, sondern wahrscheinlich auf die schlechten Wasserwegsamkeiten des unterlagernden Gesteins zurückzuführen. Der

**Tab. 6-1.** Hydrogeologische Auswertung der Kamerabefahrung Forschungsbohrung Ulrichstein/Vogelsberg, Befahrung am 04.11.1996, TK 25: 5421 Ulrichstein, Bohransatzpunkt: ca. 669 m ü. NN, R 3515830, H 5602260

<b>Teufe</b>		<b>Beobachtungen</b>	<b>Geologie</b> (KÖTT et al. 2001)	
m u. GOK	m ü. NN (ca.)		m u. GOK	
0–7,50	669,0–661,5	Hilfsverrohrung, Durchmesser 350 mm, am Ende der Verrohrung läuft Wasser ins Bohrloch	–0,20	Boden
			–0,60	Lehm
			–4,20	Basalt, zersetzt
ab 7,50	ab 661,5	offenes Bohrloch, Durchmesser 250 mm		
8,20–10,20	660,8–658,8	schwache Grundwasserzutritte	–8,20	basanitischer Lavastrom
12,90–18,50	656,1–650,5	Grundwasserzutritte, starke Klüftung	–12,95	basanitischer Lavastrom
–14,80	–654,2	Wasser spritzt aus Klüften	–14,60	basanitischer Lavastrom
–15,30	–653,7	Wasser spritzt aus Klüften		
–16,30	–652,7	Wasser spritzt aus Klüften		
–17,00	–652,0	Wasser spritzt aus Klüften		
19,30–20,00	649,7–649,0	Grundwasserzutritte, starke Klüftung		
26,70–27,50	642,3–641,5	Grundwasserzutritte, starke Klüftung	–27,40	basanitischer Lavastrom
			–27,57	Lapilli- bis Aschentuff
29,70–33,00	639,3–636,0	Klüftung, jedoch keine Grundwasserzutritte erkennbar	–29,20	Umlagerungszone
35,50–36,50	633,5–632,5	Klüftung, jedoch keine Grundwasserzutritte erkennbar	–36,40	basanitischer Lavastrom
			–36,65	Umlagerungszone
38,90–39,20	630,1–629,8	schwache Grundwasserzutritte, starke Klüftung		
44,70–46,50	624,3–622,5	starke Grundwasserzutritte, starke Klüftung	–44,90	basanitischer Lavastrom
50,40–51,60	618,6–617,4	Grundwasserzutritte	–50,40	basanitischer Lavastrom
			–54,25	basanitischer Lavastrom
55,60–56,20	613,4–612,8	Wasser spritzt aus Klüften	–55,20	Umlagerungszone
56,50–57,00	612,5–612,0	starke Grundwasserzutritte aus breiten Klüften	–56,65	basanitischer Lavastrom
			–57,70	basanitischer Lavastrom
58,20	610,8	Wasser spritzt aus Klüften	–58,95	alkali-basaltischer Lavastrom

Abschnitt zwischen 26,7 m u. GOK und 27,5 m u. GOK befindet sich in der unteren Kernzone bzw. in der Basiszone eines Lavastroms, die nach Beobachtungen auch an anderer Stelle i.d.R. sehr kompakt ist. Zwischen 27,4 m u. GOK und 27,6 m u. GOK liegt ein offensichtlich Grundwasser gering leitender bis Grundwasser stauender Lapilli- bis Aschentuff, der zur Ausbildung eines schwebenden Grundwasserkörpers im direkt darüber liegenden kompakten Basalt geführt hat.

Zu ähnlichen Ergebnissen führt die Auswertung der geophysikalischen Messungen. Der Wasser-

spiegel lag während der Bohrlochmessungen bei 184 m u. GOK (ca. 485 m ü. NN) im Bereich einer Umlagerungszone und der Topbrekzie eines hawaiitischen Lavastroms. Die Topbrekzie ist stark brüchig, so dass eine Aufweitung des Bohrloches um etwa 30 mm im Kaliber-Log zu erkennen ist. Der Wasserzufluss aus der Topbrekzie und eventuell auch aus der überlagernden Umlagerungszone war offensichtlich so stark, dass sich der Wasserspiegel im Bohrloch auf das Niveau dieses Grundwasserleiters eingestellt hat.

Die Flowmeter-Messungen, die nur für die

Strecke zwischen 186 m u. GOK bis 288 m u. GOK sowie zwischen 350 m u. GOK und 373 m u. GOK durchgeführt wurden, bestätigen die visuellen Eindrücke und Interpretationen, die durch die Kamerabefahrung gewonnen wurden. Die direkt im Bereich bzw. unterhalb des bei 184 m u. GOK liegenden Wasserspiegels lokalisierten Bruchzonen werden durch das Kaliber-Log deutlich indiziert. Beispielhaft hierfür ist der Bereich zwischen 234,5 m u. GOK und 237,0 m u. GOK. Am Gamma-Ray-Log ist der Materialwechsel von der Basiszone des Lavastroms zum unterlagernden, 0,7 m mächtigen Aschentuff durch einen Peak erhöhter Strahlungsintensität von annähernd 310 API zu erkennen. Bei etwa 236 m u. GOK beginnt eine Umlagerungszone; die Gamma-Ray-Strahlung sinkt auf unter 250 API ab. Das Kaliber-Log zeigt die Aufweitung des Bohrloches von 180 mm auf fast 270 mm. Der oberste Bereich der aus Basaltklasten in Aschentuffmatrix bestehenden Umlagerungszone ist offensichtlich so brüchig, dass es zu einer Bohrlochverbreiterung um 30% gegenüber dem benutzten Kernbohrer gekommen ist. Der Ausschlag des Flowmeters kann in dieser Zone nicht eindeutig einem Grundwasserzutritt aus der brüchigen, gut geklüfteten und damit potenziell wasserführenden Umlagerungszone zugeordnet werden. Möglich ist ebenfalls, dass es in der im Bohrloch nach unten gerichteten Wasserbewegung durch die plötzliche Aufweitung des Bohrloches zu einem stark turbulenten Fließen gekommen ist. Dagegen ist der Schwankungsbereich der Flowmeter-Messungen bei 233,5 m u. GOK eindeutig als Grundwasserzutritt zu charakterisieren. Über dem Grundwasser gering leitenden Aschentuff ist es scheinbar, wie bereits im Text weiter oberhalb für die Zone um 27,5 m u. GOK beschrieben, zur Ausbildung eines Grundwasserkörpers gekommen. Die Grundwasserzutritte befinden sich im Bereich der Kernzone eines tholeiitischen Lavastroms.

Dass die Grundwasserzutritte nicht nur an Topbrekzien gebunden sind, die mit ihren geringen Dichten und daher guten Wasserwegsamkeiten bevorzugte Grundwasserleiter sind, zeigen die Messstrecken zwischen 223,0 m u. GOK und 224,5 m u. GOK sowie das Beispiel des tholeiitischen La-

vastroms zwischen 257,7 m u. GOK und 268,5 m u. GOK. In den Bereichen dieser Topbrekzien sind keine außergewöhnlichen Schwankungen und damit keine Grundwasserzutritte aus den Gesteinen in das Bohrloch zu bemerken.

Die starken Ausschläge der Flowmeter-Kurve zwischen 274,5 m u. GOK und 280,0 m u. GOK liegen in einer Zone mit Lapilli- und Aschentuffen und in der oberen Zone eines Schlackenagglomerats. Da es im Bereich des Lapillituffs und des oberen Aschentuffs zu einer erheblichen Aufweitung des Bohrloches gekommen ist, werden die starken Schwankungen nicht auf Grundwasserzutritte zurückgeführt, sondern durch Turbulenzen erklärt, die durch die abrupte Aufweitung des Bohrloches hervorgerufen wurden. Die gleiche Interpretation ist auf die Flowmeter-Messstrecke zwischen 350 m u. GOK und 373 m u. GOK anwendbar. Die Schwankungen werden wiederum durch unterschiedliche Bohrlochdurchmesser erklärt.

Zusammenfassend lassen sich anhand der Beobachtungen an der Forschungsbohrung Ulrichstein folgende allgemeine Aussagen über die Wasserwegsamkeiten in der Gesteinsabfolge des vulkanischen Vogelsberges treffen:

- Gute Wasserwegsamkeiten hängen von der Klüftigkeit des Gesteins ab. Starke Klüftigkeiten können in Topbrekzien von Lavaströmen und in sekundären Umlagerungszonen ausgebildet sein.
- Hoher Blasenanteil ist häufig in Topbrekzien vorhanden und damit ein Hinweis auf gute Wasserwegsamkeiten.
- Starke Klüftigkeit des Gesteins und damit eine potenziell gute Wasserwegsamkeit muss nicht automatisch große Grundwasserhöflichkeit bedeuten, da überlagernde Schichten einen Grundwasserzustrom behindern oder ganz verhindern können.
- Über Grundwasser gering leitenden oder Grundwasser nicht leitenden Schichten kann es zur Ausbildung eines Grundwasserkörpers kommen. Grundwasser gering leitend können Vulkaniklastika, vertonte Paläoböden, aber auch sehr dichte und kompakte Basalte sein.
- Hydrogeologische Interpretationen von Bohrprofilen sollten nur unter Berücksichtigung von geophysikalischen Bohrlochmessungen im wasserer-

füllen Bohrloch und von Kamerabefahrungen im Wasser unerfüllten Bohrloch stattfinden. Weiter gehende Untersuchungen wie geohydraulische

Pumpversuche sind ratsam. Dies gilt insbesondere bei einer späteren Nutzung des Bohrloches zur Wassergewinnung.

### **6.4.2.2 Geophysikalische Bohrlochuntersuchungen in mehrschichtigen Kluftgrundwasserleitersystemen unterschiedlicher Gesteine**

Die Auswertung von geophysikalischen Bohrlochmessungen und hier speziell von Flowmeter-Messungen, die an Bohrungen im Arbeitsgebiet vor deren Ausbau durchgeführt wurden, bestätigt im Vergleich zu den entsprechenden Logs der Forschungsbohrung Ulrichstein die bisher erlangten Erkenntnisse über das mehrschichtige Kluftgrundwasserleitersystem des Vogelsberges. Dies gilt insbesondere für die 1972/73 abgeteuftete Forschungsbohrung 2/2A (Hasselborn, Bl. 5421 Ulrichstein, R 352081, H 559889, Ehrenberg et al. 1981b). Auch bei dieser Bohrung stellten sich mit fortschreitender Tiefe unterschiedliche Wasserspiegel ein. Das obere (530–559 m ü. NN) und das mittlere Niveau (470–500 m ü. NN) der Grundwasserspiegel in der Forschungsbohrung Hasselborn wurden in der Forschungsbohrung Ulrichstein am 04.11.1996 mit 553 m ü. NN bzw. am 18.6.1996 und am 26.6.1996 mit 485 m ü. NN wieder angetroffen. Die damalige Folgerung von Hölting in Ehrenberg et al. (1981b), dass die Bohrlochwasserspiegellagen unterschiedliche hydraulische Potenzialniveaus von schwebenden Grundwasserstockwerken sind, wird durch die Forschungsbohrung Ulrichstein bestätigt.

Bei der Brunnenbohrung B 142 des Wasserwerkes Rainrod handelt es sich um eine Versuchsbohrung mit anschließender Hauptbohrung (HLfB-Archiv-Nr. 5520/106). Die Bohrung, die Anfang der 70er Jahre durchgehend im basaltischen Tertiär abgeteuft wurde, ist im Auftrag der Oberhessischen Versorgungsbetriebe AG (OVAG) durchgeführt worden und wird bis in die Gegenwart als Trinkwasserbrunnen genutzt. Da ein Spülbohrverfahren verwendet wurde, ist eine exakte Beurteilung des geologischen Aufbaus und der Beschaffenheit der Gesteine in den unterschiedlichen Bereichen der lokalisierten Grundwasserzutritte nicht möglich. Die Grundwasserzutritte wurden

durch Flowmeter-Messungen indiziert. Mit zunehmender Bohrteufe verstärkte sich ein von Beginn der Bohrung an zu beobachtender Überlauf schubweise. Bis zu einer Teufe von 35 m u. GOK (ca. 139 m ü. NN) lag der Überlauf bei etwa 9 m<sup>3</sup>/h. Dieser steigerte sich bis zur Endteufe von 100 m u. GOK auf rd. 155 m<sup>3</sup>/h. Die im angeregten Zustand bei einer Pumpleistung von ca. 360 m<sup>3</sup>/h durchgeführten Flowmeter-Messungen lassen Grundwasserzutritte in den Bereichen 12–18 m u. GOK, 31–35 m u. GOK, 48–50 m u. GOK, 57–69 m u. GOK, 87–91 m u. GOK und 96–98 m u. GOK erkennen. Das Schichtenprofil weist für jede der Grundwasser führenden Zonen Basalt als anstehendes Gestein aus.

Die B 142 befindet sich im Niddatal im Wassergewinnungsgebiet Rainrod. Für das Wasserwerk wird von einer Grundwasserpotenzialfläche des unteren Entnahmestockwerkes bei ca. 140 m ü. NN ausgegangen (CD Anl. 2, Abb. 7-3). Die oben beschriebenen Messergebnisse zeigen, dass die Ergiebigkeiten der Entnahmestockwerke, ebenso wie die bei den schwebenden Grundwasserstockwerken der Forschungsbohrung Ulrichstein, von den Durchlässigkeiten der verschiedenen Gesteinslagen abhängig sind. Die Entnahmestockwerke in den tieferen Bereichen des Vogelsberges sind zwar ab einem entsprechenden Potenzial nach unten durchgehend wassergesättigt, jedoch lassen sie sich bis zur Basis der Basaltfolge in unterschiedlich viele Einzelstockwerke untergliedern, die jeweils verschiedene hydraulische Leistungscharakteristika und Potenziale haben.

Geophysikalische Bohrlochuntersuchungen an Bohrungen, die außerhalb des vulkanischen Teilarbeitsbereiches liegen, aber ebenfalls in einem Kluftgrundwasserleitersystem stehen, weisen ähnliche bis gleiche hydraulische Eigenschaften auf wie die oben beschriebene Basaltbohrung.

Die im Jahre 1976 mit einem Rotary-Verfahren gebohrte Grundwassermessstelle 1 (HLfB-Archiv-Nr. 5721/939, R 351302, H 556731, später zu Brunnen D des Wasserwerkes Gettenbach ausgebaut) steht im oberirdischen Einzugsgebiet des Gettenbachs mit 152 m in den Schichten des Unteren Buntsandsteins. Bei Flowmeter-Messungen, die im angeregten Zustand mit einer Pumpleistung von 20 m<sup>3</sup>/h durchgeführt wurden, lassen sich drei Bereiche von Wasserzutritten in das Bohrloch für die Bohrstrecke zwischen 50 und 150 m u. GOK erkennen. Der Ruhewasserspiegel (17,10 m u. GOK; ca. 177 m ü. NN) im Bohrloch stellte sich während des Pumpversuches mit 59,60 m u. GOK auf den obersten Grundwasserzutrittsbereich zwischen 58 und 60 m u. GOK ein. Hier waren mit fast 9 m<sup>3</sup>/h die stärksten Zutritte. Unterhalb befinden sich zwei weitere Zuflüsse, die mit 2,4 m<sup>3</sup>/h bzw. 1,0 m<sup>3</sup>/h deutlich geringer ausfallen. Die restlichen Gesteine der Messstrecke weisen keine quantifizierbaren Grundwasserzutritte auf und haben somit keinen Anteil an der Förderleistung.

Die 1989 gebohrte und von den Stadtwerken Büdingen in Auftrag gegebene 200 m tiefe Versuchsbohrung Diebach 2 (Bl. 5720 Büdingen, R 350616, H 556812, HLfB-Archiv-Nr. 5720/161) befindet sich in den Ton- und Schluffsteinen des Rotliegenden. Obwohl der Ruhewasserspiegel von 28,45 m u. GOK (ca. 164 m ü. NN) und der bei einer Förderung von 9,2 l/s festgestellte Wasserspiegel maximaler Absenkung von 53,53 m u. GOK vordergründig auf ein zusammenhängendes Entnahmestockwerk schließen lassen, wurden mittels Flowmeter-Messungen bei einer Förderleistung von 32 m<sup>3</sup>/h drei Zonen mit unterschiedlich starken Grundwasserzutritten festgestellt. Die Messungen wurden für die Strecke zwischen Brunnensohle und 60 m u. GOK durchgeführt. Für den gesamten Bereich wird von einer vollständigen Grundwasser-sättigung ausgegangen. Eine hydraulische Anbindung der benachbarten Grundwasserstockwerke ist bei einer räumlichen Entfernung der einzelnen Zonen mit Grundwasserzutritten von 2–3 m nicht auszuschließen. Die Leistungscharakteristika der

Zonen werden durch die Durchlässigkeit der Gesteine bestimmt. Eine Zone mit scheinbaren Wasserverlusten ist hierbei nur wenige Meter von Bereichen mit Wasserzutritten (insgesamt ca. 11 m<sup>3</sup>/h) entfernt. Wahrscheinlich liegt bei diesem Abschnitt eine Bohrlochaufweitung vor, die zu einem stark turbulenten Fließen im Bohrloch und somit zu einem negativen Ausschlag in der Messkurve des Flowmeters geführt hat. Kalibermessungen, die hierüber Aufschluss geben könnten, wurden nicht durchgeführt.

Die ausgewerteten Bohrlochlogs zur Geohydraulik haben in den Gesteinen des basaltischen Tertiärs, des Buntsandsteins und des Rotliegenden keine Unterschiede im Aufbau der verschiedenen Kluffgrundwasserleitersysteme erbracht. Da unterschiedliche Leistungscharakteristika und Potenziale in den einzelnen Zonen verstärkter Grundwasserdurchlässigkeit bestehen, liegt in keinem Fall eine vereinheitlichte Gruppe von Grundwasserleitern vor, so dass nur sehr vereinfachend von **einem** Hauptgrundwasserstockwerk gesprochen werden kann.

Durch ein Bohrloch wird künstlich ein hydraulisches System geschaffen, das unterschiedliche Grundwasserstockwerke miteinander verbindet. Das Ermitteln von Leistungscharakteristika für das Gesamtsystem eines Bohrloches kann unter wasserwirtschaftlichen Gesichtspunkten von Interesse sein, muss unter hydrogeologischen Gesichtspunkten jedoch als nicht ausreichend bezeichnet werden. Wertvolle Informationen gehen verloren. Eine detaillierte Betrachtung der einzelnen Grundwasserleiter kann wesentlich zur Leistungssteigerung eines Brunnens beitragen. Für eine umfangreiche hydrogeologische Interpretation sollte ein Kernbohrverfahren verwendet werden, das ein Maximum an Informationen zu den Gesteinen und deren hydraulischen Kenngrößen liefert. Unzureichende Bohrverfahren, wie z.B. Spülbohrverfahren, lassen eine Gesteinsansprache und deren hydrogeologische Beurteilung in Abstimmung mit geophysikalischen Bohrlochuntersuchungen und geohydraulischen Pumpversuchen nicht oder nur sehr bedingt zu.

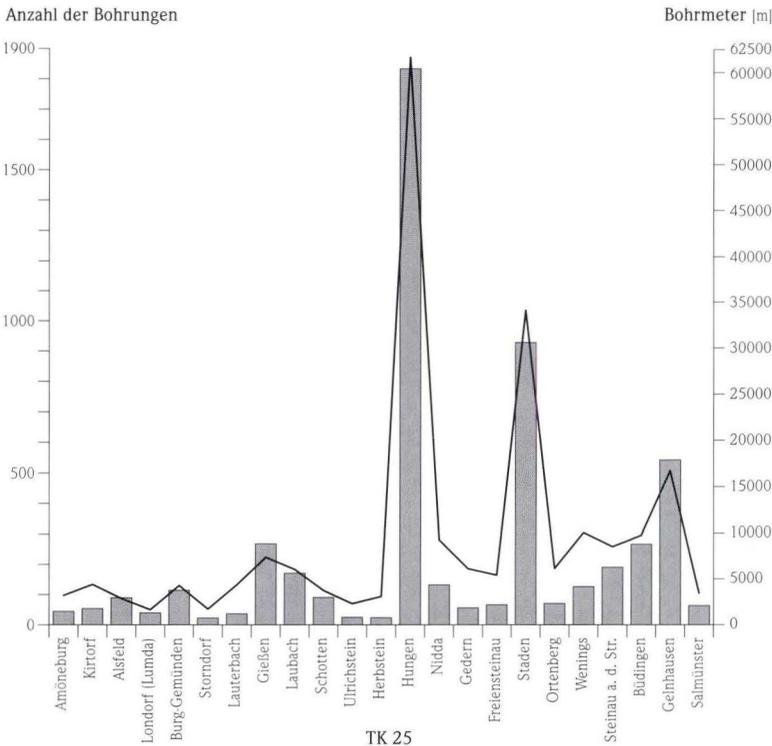
### 6.4.2.3 Bohrungsdichte und Brunnenleistungen

Im Rahmen der Arbeit wurden die Daten von 6 134 Bohrungen (CD Anl. 5) mit einer Mindesttiefe von 10 m überarbeitet. Die Bohrungen haben eine Gesamtbohrstrecke von 239 459 m. 82,7% der Bohrungen haben eine Tiefe zwischen 10–50 m, 10,5% eine Tiefe zwischen 50–100 m und 6,8% eine Tiefe von mehr als 100 m. 1421 Bohrungen (23,1%) wurden zur Erkundung oder Erschließung von Grundwasser abgeteuft. Bei 50,4% der Bohrungen handelt es sich um Lagerstättenbohrungen; 24,6% sind Baugrundbohrungen.

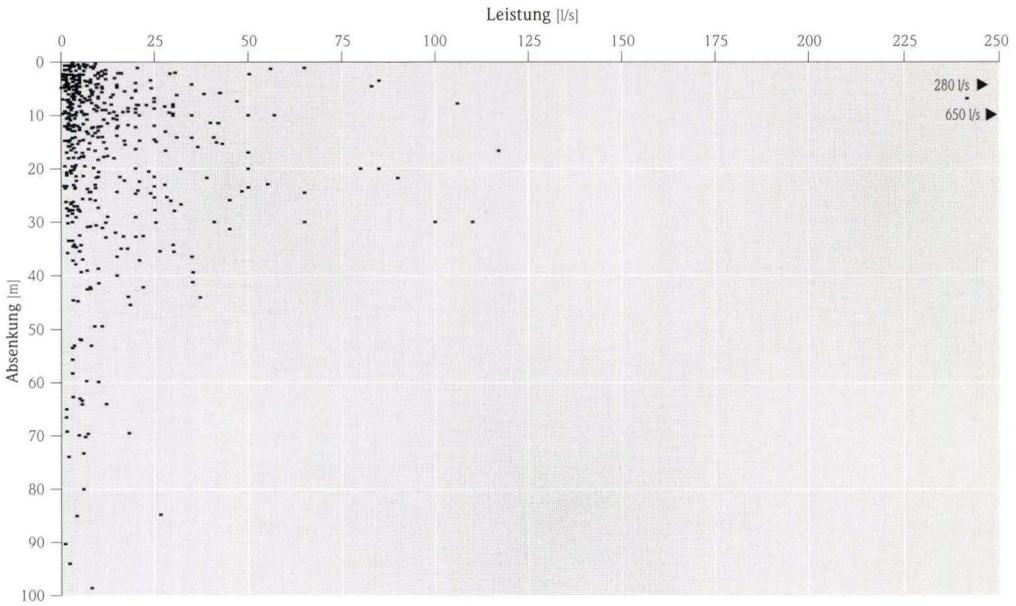
Die Verteilung der Bohrungen im Untersuchungsgebiet variiert stark (Abb. 6-23, CD Anl. 5). Das Bl. 5519 Hungen umfasst mit 1833 Bohrungen allein etwa 30% aller Bohrungen des Arbeitsgebietes. Hiervon wurden 89% zur Prospektion von Braunkohlevorkommen abgeteuft. Die mittlere Bohrdichte beträgt auf Bl. Hungen 13,9 Bohrungen/km<sup>2</sup>. Die Verteilung auf diesem Blatt ist jedoch

wiederum extrem ungleichmäßig. Im Bereich der Braunkohleabbau des sedimentären Horloffgrabens liegt eine starke Häufung vor. Die Bohrdichte beträgt hier 35,4 Bohrungen/km<sup>2</sup> gegenüber 7,5 Bohrungen/km<sup>2</sup> im vulkanisch überdeckten Bereich des Blattes. Der letztgenannte Wert liegt weit über dem Mittelwert von 1,3 Bohrungen/km<sup>2</sup> für das in der Basaltverbreitung gelegene Arbeitsgebiet. Hohe Bohrdichte weisen noch das Bl. 5619 Staden (7,0 Bohrungen/km<sup>2</sup>) und die bearbeitete 32 km<sup>2</sup> große Teilfläche des Bl. 5618 Friedberg (8,1 Bohrungen/km<sup>2</sup>) auf.

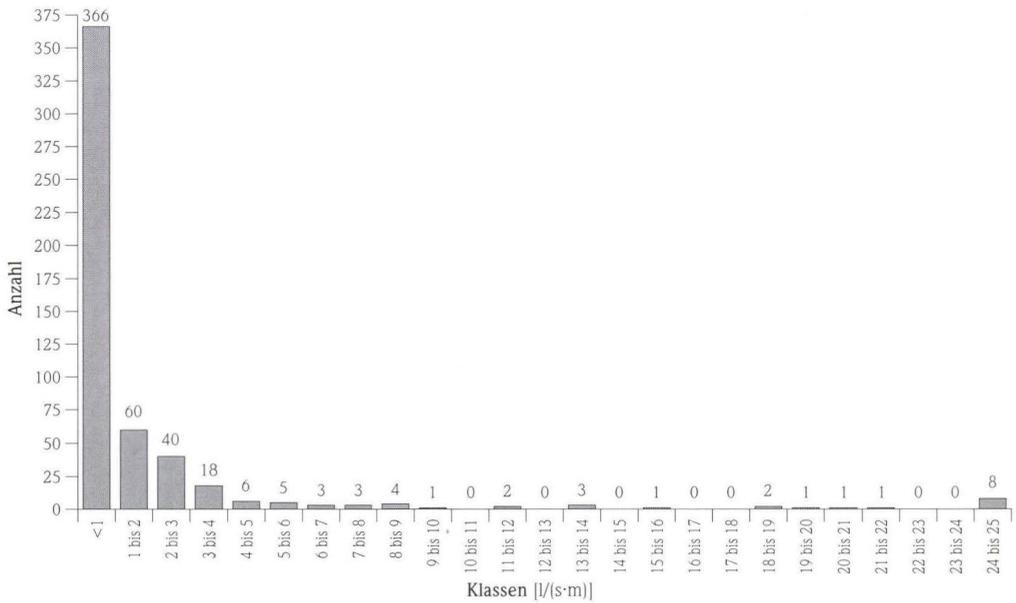
Die Förderleistungen der Bohrungen im Arbeitsgebiet differieren stark (Abb. 6-24). Das Spektrum reicht von trockenen Bohrungen bis zu sehr leistungsstarken Brunnen (Abb. 6-25). Die im Arbeitsgebiet abgeteuften Bohrungen haben bei einer mittleren Absenkung von 32,3 m eine mittlere Entnahmerate von 10,3 l/s. Die Bandbreite der Ent-



**Abb. 6-23.** Verteilung der Bohrungen und Bohrmeter im Arbeitsgebiet, gegliedert nach komplett bearbeiteten TK 25 (zur Flächenverteilung siehe Tab. 7-1).



**Abb. 6-24.** Leistungs-Absenkungs-Quotienten ( $L_q$ ) von Pumpversuchen an Brunnen.



**Abb. 6-25.** Verteilung der Leistungs-Absenkungs-Quotienten ( $L_q$ ).

nahmerate liegt bei den an Bohrungen durchgeführten Pumpversuchen zwischen 0,02 l/s und 140 l/s. Der kleinste und der größte Leistungs-Absenkungs-Quotient betragen  $7,45 \cdot 10^{-4}$  l/(s·m) bzw. 59,1 l/(s·m).

Bei den vulkanischen Gesteinen wird nicht von einer allgemein guten bis sehr guten Durchlässigkeit der Gesteine ausgegangen (Kap. 6.4.2). Vielmehr besteht die Gesteinsabfolge aus einer Wechsellagerung von durchlässigen bis stark durchlässigen mit schwach durchlässigen bis undurchlässigen Gesteinen. Die Leistung der Brunnen ist von den Wasserwegsamkeiten und damit von der Kluftdichte und der Kluffweite der Gesteine abhängig. Gering durchlässige Gangsysteme sind für die Hydrogeologie des Vogelsberges von untergeordneter Bedeutung. Sie haben lediglich einen Anteil von wenigen Prozent am Gesteinsvolumen (< 5%, frdl. mdl. Mittl. Ehrenberg).

Die extreme Leistung von 650 l/s ist ein Einzelfall, der im westlichen Vogelsberg beim Brunnen XVI (Wasserwerk Inheiden, OVAG) erreicht wird. Der Grund für diesen Wert ist in den besonderen tektonischen Bedingungen des Horloffgrabens und der Lage des Wasserwerkes in diesem System zu sehen (Kap. 6.4.2.5). Für das vom Vogelsbergkern nach Westen abströmende Grundwasser wirken die annähernd NNE–SSW verlaufenden Störungen des Horloffgrabens als ein Dränsystem, das im nördlichen Teil des tektonisch bedingten Grabens zusammenläuft. Der Brunnen XVI liegt dabei offensichtlich genau auf der östlichen Grabenhauptstörung, die eine Klaffweite von mehreren Dezimetern hat.

Weitere Brunnen mit Leistungen > 100 l/s sind im südwestlichen Arbeitsgebiet im Wasserwerk Orbes (Br. 64 und Br. 99) und im oberirdischen Einzugsgebiet der Salz im östlichen Vogelsberg (FB V und FB VIII) zu finden. Im Salzgebiet wird aus ökologischen Gründen auf eine Förderung von Grundwasser verzichtet. Die fertig installierten Brunnen werden als Grundwassermessstellen genutzt. Ebenfalls als Grundwassermessstellen werden die potenziell sehr leistungsstarken Brunnen GWM 165 und GWM 167 (OVAG) des Ohmgebietes im nordwestlichen Vogelsberg verwendet. Ihre durch

Pumpversuche festgestellten Förderleistungen liegen jeweils zwischen 65 und 85 l/s. Ähnlich hohe Werte werden in den Wassergewinnungsgebieten Gedern (Br. 136 und Br. 148), Kohden (Br. 82 und Br. 89) und Neuenschmidten (FB 9) erreicht. Die letztgenannten Brunnen werden dauerhaft zur Trinkwassergewinnung genutzt.

Die im vulkanischen Arbeitsgebiet liegenden leistungsstarken Brunnen stehen in der hydrogeologischen Zone der Durchgehenden Grundwasser-sättigung. Die großen Leistungen werden zumeist durch die künstliche Verbindung von mehreren Grundwasserstockwerken in einem Bohrloch erreicht. Die Grundwasserstockwerke haben dabei unterschiedliche Durchlässigkeiten und Ergiebigkeiten. Die ermittelten Leistungs-Absenkungs-Quotienten (Lq) charakterisieren die hydrologische Situation des Bohrloches und der damit aufgeschlossenen Grundwasserstockwerke als Ganzes. Detailinformationen zu Einzelstockwerken sind in den Werten nicht enthalten.

Extreme Brunnenleistungen werden nicht allein durch die Verbindung mehrerer Grundwasserstockwerke erklärt. Hierfür ist eine besondere tektonische Situation notwendig, die neben der hydraulischen Verbindung verschiedener Grundwasserstockwerke auch über eine entsprechende Aufweitung und Ausdehnung der Klüfte verfügt. Generell ist bei Förderleistungen > 50 l/s eine tektonisch bedingte Sonderstellung wahrscheinlich.

Wie im Kap. 6.4.2.2 bereits ausgeführt, weisen die verschiedenen Gesteine des Arbeitsgebietes ähnliche bis gleiche hydraulische Charakteristika auf. In den Abfolgen des Rotliegenden und des Buntsandsteins sind vergleichbare hydraulische Bedingungen zwischen den einzelnen Grundwasserstockwerken anzutreffen wie in der vulkanischen Gesteinsserie des Vogelsberges. Die mittlere Leistung der Brunnen, die im Buntsandstein verfiltert sind, fällt jedoch gegenüber den Brunnen, die im Basalt stehen, um 30% von 15,2 l/s auf 10,6 l/s zurück. Die maximale Förderleistung wird in dieser Formation mit 36,6 l/s beim 144 m tiefen Förderbrunnen VII des ehemals geplanten Wassergewinnungsgebietes Breitenborn erreicht.

#### 6.4.2.4 Grundwasserstandsganglinien

Bei einer Positionsanalyse, also der Zuordnung eines Grundwasserspiegels einer Grundwassermessstelle zu einem oder mehreren Grundwasserstockwerken bzw. deren Grundwasserpotenzialflächen, wurde sowohl das Zeitprinzip als auch das Stockwerksprinzip angewendet.

##### **Stockwerksprinzip**, Definition:

Der Grundwasserspiegel einer Grundwassermessstelle wird nach dem Ausbau und hierbei insbesondere nach der Filterstrecke **einem** Grundwasserstockwerk zugeordnet.

##### **Zeitprinzip**, Definition:

Der Grundwasserspiegel einer Grundwassermessstelle wird bei einem Ausbau der Grundwassermessstelle, der zu einer Verbindung von mindestens zwei Grundwasserstockwerken führt, zu verschiedenen Zeitpunkten entweder einem Mischwasserspiegel zwischen den Grundwasserstockwerken oder dem Grundwasserpotenzial eines der Grundwasserstockwerke zugeordnet.

Beim Stockwerksprinzip werden die Schwankungen eines Grundwasserspiegels durch die sich zumeist witterungsbedingt ändernden hydraulischen Druckbedingungen in einem Grundwasserstockwerk erklärt (Abb. 6-14, Grundwassermessstellen A, B, D, F und G). Das Zeitprinzip wird bei der Verbindung von mindestens zwei Grundwasserstockwerken verwendet (Abb. 6-14, Grundwassermessstellen C und E). Die Grundwasserspiegelschwankungen sind abhängig von den hydraulischen Kenngrößen (z.B. Durchlässigkeiten) und von den hydraulischen Druckhöhen der durch die Grundwassermessstelle in Verbindung stehenden Grundwasserstockwerke.

Eine Zuordnung verschiedener durch eine Bohrung aufgeschlossener Grundwasserpotenziale zu den jeweils dazugehörigen Grundwasserstockwerken ist in einem mehrschichtigen Kluftgrundwasserleitersystem nur unter Verwendung mehrerer Informationsebenen möglich (Kap. 6.4.1). In Abb. 6-13 sind die Grundwassermessstellen in jeweils

nur einem Grundwasserleiter verfiltert. Für diese Grundwassermessstellen gilt das Stockwerksprinzip. Wenn die Grundwasserstockwerksgliederung jedoch nicht erkannt wird und eine Grundwassermessstelle mehrere Grundwasserleiter miteinander verbindet, bilden sich Mischwasserspiegel aus (Abb. 6-14, Grundwassermessstellen C und E). Für solche Grundwassermessstellen gilt das Zeitprinzip.

In den drei hydrogeologischen Zonen (Kap. 6.3.1) des vulkanischen Vogelsberges liegen unterschiedliche hydraulische Voraussetzungen zwischen den einzelnen Grundwasserstockwerken vor.

##### **Oberwaldzone**

Die Oberwaldzone besteht aus einer Wechselfolge von Grundwasser leitenden mit Grundwasser gering- bzw. Grundwasser nicht leitenden Schichten (Kap. 6.4.2.1). Trotz der hohen Niederschläge hat sich im Oberwald keine zusammenhängend Grundwasser gesättigte Zone entwickelt. In der vulkanischen Abfolge haben sich vielmehr mehrere schwebende Grundwasserstockwerke ausgebildet. Die große Anzahl von Grundwasseraustritten (Kap. 6.3.1) und deren zumeist ganzjährigen Schüttungen deuten darauf hin, dass es in Zeiträumen mit hoher Grundwasserneubildung zu hydraulischen Kontakten zwischen den Grundwasserstockwerken kommt. Im Verlauf eines Jahres verschiebt sich in Abhängigkeit von der Grundwasserneubildung das Verhältnis von gesättigten zu ungesättigten Gesteinsschichten.

##### **Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke**

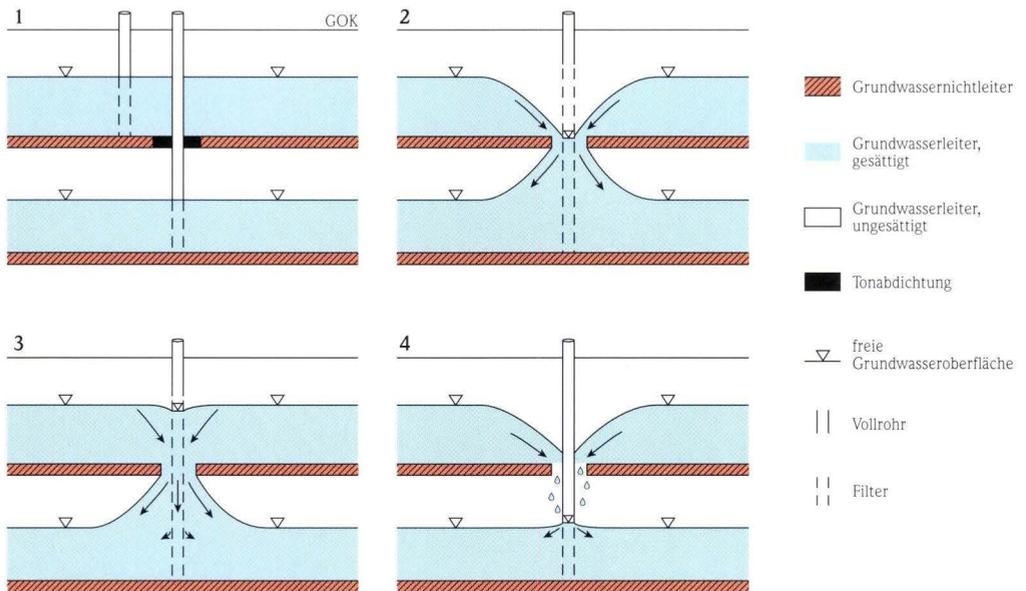
In der Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke bilden sich bei zwei söhlig gelagerten Grundwasserstockwerken in einer durchgehend verfilterten Grundwassermessstelle unterschiedliche Mischwasserspiegel aus. Die Durchlässigkeiten der einzelnen Grundwasserleiter sind bei einem für die einzelnen Grundwasserstockwerke quantitativ gleich bleibenden Grundwasserzustrom entscheidend für die Höhe des Mischwasserspiegels in der Grundwassermessstelle.

In Beispiel 1 (Abb. 6-26) stehen im oberen und unteren Grundwasserstockwerk je eine Grundwassermessstelle. Durch eine Tonabdichtung im Niveau des oberen Grundwassergeringleiters wird bei der rechten Grundwassermessstelle eine Aussickerung von Grundwasser aus dem oberen in das untere Grundwasserstockwerk verhindert. Die Grundwassermessstellen zeigen den Wasserstand des Grundwasserstockwerkes an, in dem sie verfiltert sind. Im Beispiel 2 haben das obere und das untere Grundwasserstockwerk dieselben Durchlässigkeiten. Die eingezeichnete Grundwassermessstelle verbindet die beiden Grundwasserstockwerke. Es kommt zu einer Aussickerung von Grundwasser aus dem oberen in das untere Grundwasserstockwerk. Der Grundwasserspiegel in der Grundwassermessstelle, die durchgehend in beiden Grundwasserleitern verfiltert ist, stellt sich bei gleichen Durchlässigkeiten genau zwischen den Grundwasseroberflächen der beiden Grundwasserstockwerke ein (Abb. 6-27). Im Beispiel 3 hat das obere Grundwasserstockwerk die höhere Durchlässigkeit gegenüber dem unteren Grundwasserstockwerk; der Wasserspiegel in der Grundwassermessstelle liegt im Ni-

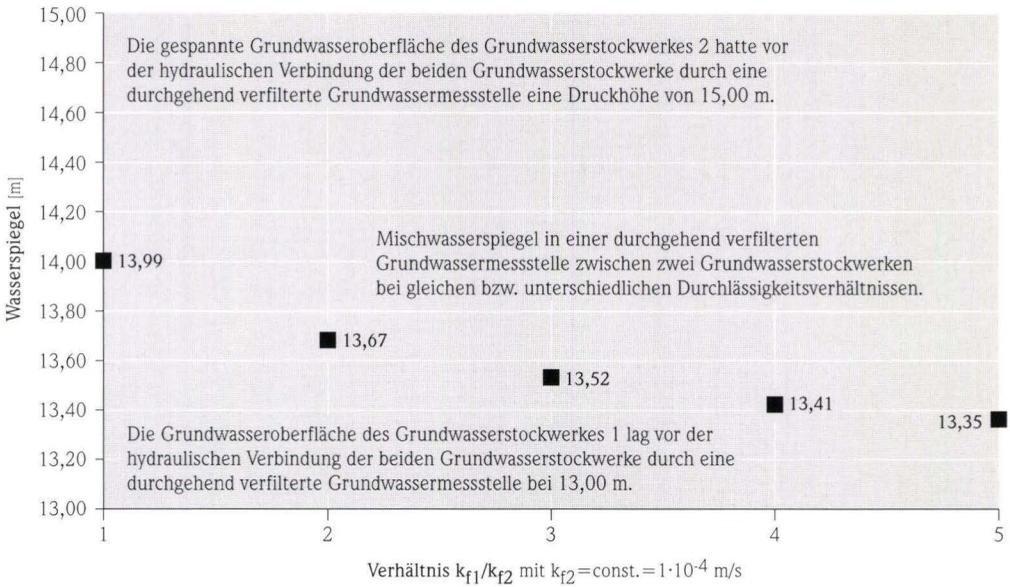
veau des oberen Grundwasserstockwerkes. Im Beispiel 4 verhält sich dies genau umgekehrt. Die höhere Durchlässigkeit ist im unteren Grundwasserstockwerk vorhanden; der Wasserspiegel in der Grundwassermessstelle stellt sich im Bereich des unteren Grundwasserstockwerkes ein.

In Ausnahmefällen kommt es in der Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke zu hydraulischen Verbindungen zwischen Grundwasserstockwerken. Eine hydraulische Verbindung zwischen zwei Grundwasserstockwerken besteht, wenn der Druckspiegel des unteren Grundwasserstockwerkes über der Sohlfläche des oberen Grundwasserstockwerkes liegt und die trennende Schicht zwischen den Grundwasserstockwerken Grundwasser durchlässig ist.

In dem mit Modflow simulierten Fall (Abb. 6-27) befindet sich zwischen zwei Grundwasserleitern eine undurchlässige Schicht. Das obere Grundwasserstockwerk hat eine Druckhöhe von 13 m. Das untere Grundwasserstockwerk ist unter der undurchlässigen Schicht gespannt; die Druckhöhe liegt bei 15 m. Eine durchgehend verfilterte Grundwassermessstelle ( $k_f = 1 \text{ m/s}$ ) verbindet die



**Abb. 6-26.** Wasserspiegel in Abhängigkeit von den Durchlässigkeiten einzelner Grundwasserleiter.



**Abb. 6-27.** Darstellung einer hydraulischen Simulation (Modflow) für die Ausbildung von Mischwasserspiegeln bei der hydraulischen Verbindung von zwei Grundwasserstockwerken mit gleichen bzw. unterschiedlichen Durchlässigkeiten durch eine Grundwassermessstelle.

beiden Grundwasserstockwerke. Die Höhe des Mischwasserspiegels in der Grundwassermessstelle ist abhängig von den Durchlässigkeiten der einzelnen Grundwasserleiter. Bei gleichen Durchlässigkeiten ( $k_{f1} = k_{f2} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ ) liegt der Wasserspiegel in der Messstelle mit 14 m genau zwischen den Potenzialen. Wenn die Durchlässigkeit eines Grundwasserleiters verändert wird, verschiebt sich der Mischwasserspiegel in Richtung des Wasserspiegels im Grundwasserleiter mit der größeren Durchlässigkeit. Die Modellrechnung zeigt, dass im Vergleich zu der gesamten Spannweite der Durchlässigkeiten bereits relativ geringe Änderungen von  $1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$  auf  $5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$  deutliche Verschiebungen des Wasserspiegels bewirken. Unterschiede in den Durchlässigkeiten von einer oder mehreren Zehnerpotenzen führen dazu, dass sich der Mischwasserspiegel auf das Niveau des höher durchlässigen Grundwasserleiters einstellt.

Bei einer hydraulischen Verbindung wird in Abhängigkeit von der Leckagerate des Grundwassergeringleiters, der zwischen den Grundwasserleitern liegt, und in Abhängigkeit von der Zeit bei

gleich bleibenden Bedingungen davon ausgegangen, dass es zu einem Druckausgleich zwischen den Grundwasserstockwerken kommt und sich ein gemeinsamer Grundwasserspiegel ausbildet. Je geringer die Durchlässigkeit des Grundwassergeringleiters ist, desto langsamer findet ein Druckausgleich statt. Für den Fall, dass sich kein gemeinsamer Druckspiegel eingestellt hat, gelten die oben aufgeführten Beispiele. Bei durchlässigen bis stark durchlässigen Gesteinen sind konstante Mischwasserspiegel in der Regel bereits nach Minuten bis Tagen zu erwarten; Ausnahmen sind bei besonderen hydrologischen Bedingungen, z.B. großen Grundwasserdargeboten, möglich. Bei Beteiligung von schwach durchlässigen Schichten kann es andererseits erst mittelfristig (Wochen bis Monate) bis langfristig (Jahre) zur Ausbildung von konstanten Mischwasserspiegeln kommen.

Beispiel 1 (Abb. 6-28)

Die Landesgrundwasserdienstmessstelle Beltershain ist ein Beispiel für stark schwankende Grundwasserspiegel in der Zone der Schwebenden

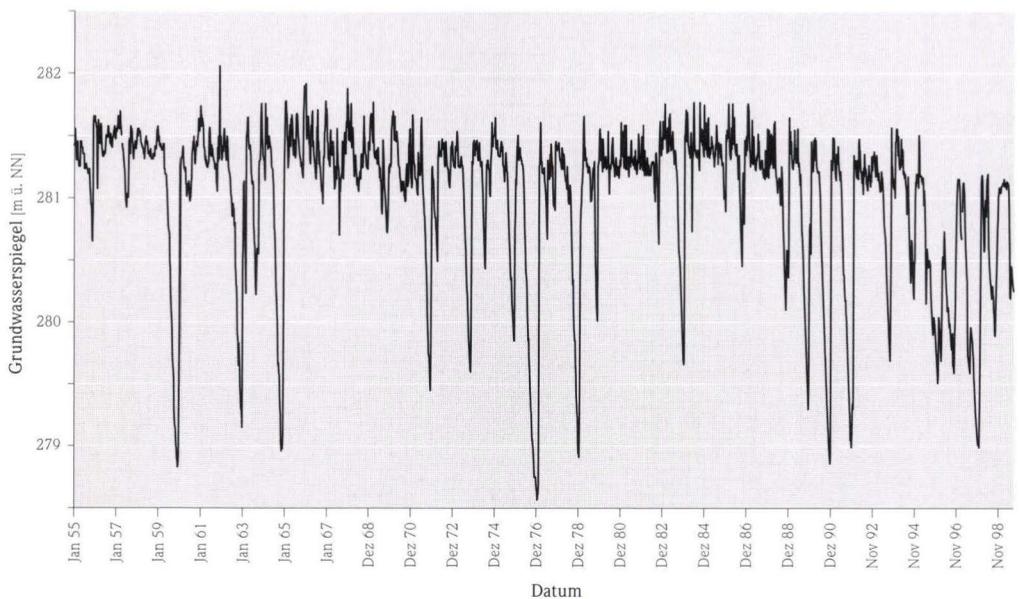
Grundwasserstockwerke. Es handelt sich um einen 13,10 m tiefen Schacht in Ortslage am nordwestlichen Rand des Arbeitsgebietes (Bl. 5319 Londorf, R 349540, H 560926). Der Schacht, der einen Durchmesser von 900 mm hat, steht in den Schichten des basaltischen Tertiärs. Abstichmessungen finden wöchentlich statt. Die Messstelle hat zum überwiegenden Teil einen Grundwasserspiegel um 280,8 m ü. NN, der etwa 1 m unter dem Messpunkt (281,86 m ü. NN) liegt.

Die Ortschaft Beltershain liegt auf einer oberirdischen Wasserscheide zwischen der Lumda im Norden und der Wieseck im Süden. Die Bäche um den Ort waren während der hydrologischen Kartierung im Spätsommer 1995 trockengefallen (Abb. 6-34). Ein Einfluss durch Fließgewässer ist nicht gegeben, da die Vorflut unter dem tiefsten Niveau (278 m ü. NN) des in der Messstelle angezeigten Wasserspiegels liegt.

Die Grundwassermessstelle verbindet wahrscheinlich zwei Grundwasserstockwerke, die über stark eingeschränkte Einzugsgebiete verfügen (2B-Typ). Mit steigender Temperatur und aufkommender Vegetation ab den Monaten März und April liegt die potenzielle Evapotranspiration über der

Niederschlagsmenge; es findet keine oder eine nur noch sporadische Grundwasserneubildung statt. Der Abfluss aus dem oberen Grundwasserstockwerk liegt über dem Zufluss ( $A/Z > 1$ ). Die Grundwasserspiegel unter 280,5 m ü. NN werden als Leerlaufen des oberen Grundwasserstockwerkes gedeutet. Ein darunter liegendes konstantes Niveau stellt sich nicht ein. Über den gesamten Beobachtungszeitraum (1955–1993) ist daher keine Aussage darüber möglich, ob das obere Grundwasserstockwerk vollständig leer gelaufen ist und damit ein tieferes Niveau angezeigt wird.

Da das obere Grundwasserstockwerk nicht abrupt leer läuft, sondern der Quotient aus Abfluss und Zufluss ( $A/Z$ ) sich nur langsam umkehrt, fällt der Grundwasserspiegel dementsprechend langsam. Diese Phase dauert mehrere Wochen. Im hydrologischen Winterhalbjahr ( $A/Z < 1$ ) füllt sich das obere Grundwasserstockwerk wieder auf. Die oberen Grundwasserstockwerke reagieren allgemein aufgrund ihrer exponierten Lage am schnellsten auf die Grundwasserneubildung. Der Grundwasserspiegel stellt sich in dieser Phase wieder auf das obere Grundwasserstockwerk ein. Der Anstieg beträgt in wenigen Tagen mehrere Meter.



**Abb. 6-28.** Wasserstandsganglinie der Landesgrundwasserdienstmessstelle Beltershain (461024), wöchentlicher Messturnus.

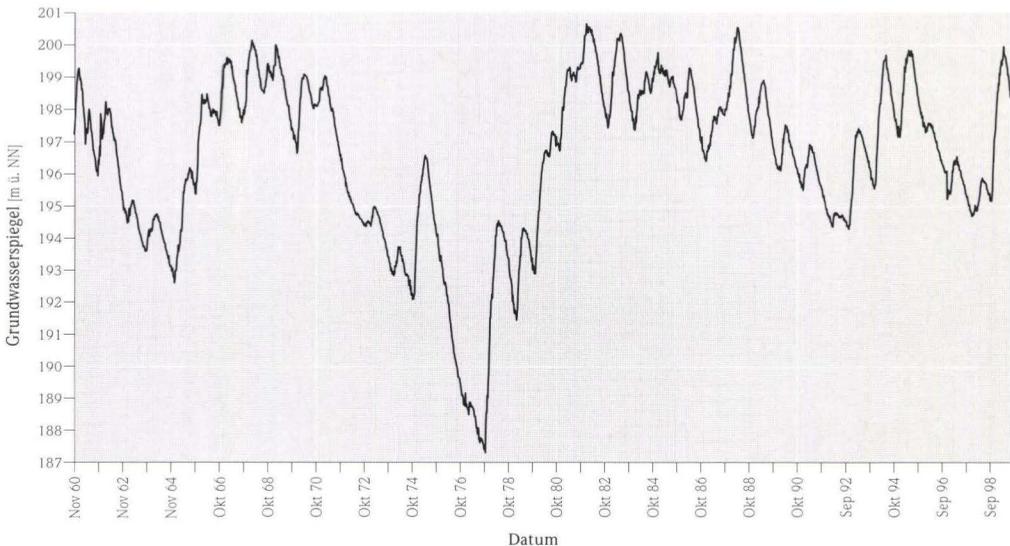
### Beispiel 2 (Abb. 6-29)

Die im Jahr 1959 gebaute Landesgrundwasserdienstmessstelle Lauter liegt rd. 1,5 km südwestlich der Ortschaft Lauter in einem Seitental unterhalb der L 3007 (Bl. 5419 Laubach, R 349662, H 560307). Sie ist 50,0 m tief (160,3 m ü. NN) und hat über die oberen 14 m eine Tonabdichtung. Der Durchmesser der Grundwassermessstelle beträgt 300 mm.

Die Grundwassermessstelle Lauter liegt in der Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke. Sie durchteuft u.a. die Grundwasserstockwerke der Potenzialflächen Lauter/Queckborn und Wetterfeld (Abb. 6-17, CD Anl. 2). Im Niveau der oberen Grundwasserstockwerke ist die Messstelle abgedichtet, so dass der Grundwasserspiegel der Messstelle der Grundwasserpotenzialfläche Wetterfeld zugerechnet wird. Die Grundwasserstandsganglinie spiegelt den Jahresgang der Grundwasserneubildung mit hohen Grundwasserständen im Frühjahr und niedrigen Grundwasserständen im Spätsommer wider. Die Schwankungen innerhalb eines Jahres betragen je nach Niederschlagsverhältnissen wenige Dezimeter bis zu mehrere Meter.

Die Messstelle hat in Jahren mit mittleren Niederschlägen einen Wasserstand um die 198 m ü. NN. Der höchste Wasserstand für den Beobachtungszeitraum zwischen dem 07.11.1960 bis zum 30.12.1996 wurde am 11.01.1982 mit 200,66 m ü. NN gemessen. In extremen Trockenperioden wie in den 70er Jahren ist der Wasserspiegel gegenüber diesem Niveau um über 13 m abgesunken; der niedrigste Wert wurde am 07.11.1977 mit 187,31 m ü. NN aufgenommen. Mitte der 60er und zu Beginn der 90er Jahre waren ebenfalls Perioden mit unter dem Mittel liegenden Niederschlägen, die sich deutlich in der Ganglinie abzeichnen. Mittlere bis über dem Mittel liegende Niederschläge nach diesen Trockenphasen ließen den Grundwasserstand jedoch wieder auf das „Normal“-Niveau bei ca. 198 m ü. NN ansteigen.

Eine Beeinflussung der Grundwassermessstelle durch die Grundwasserförderungen in dem südöstlich gelegenen Wasserwerk Wetterfeld ist nicht zu erkennen. Zwar fördert der Brunnen Wetterfeld 1 aus demselben Grundwasserstockwerk, jedoch beeinflusst die Absenkung in dem natürlichen Grundwasseraustrittsgebiet um die Brunnen die Messstelle Lauter nicht.



**Abb. 6-29.** Wasserstandsganglinie der Landesgrundwasserdienstmessstelle Lauter (461032), wöchentlicher Messturnus.

Der 150 m tiefe Brunnen Wetterfeld 2 weist einen Betriebswasserspiegel um 170 m ü. NN auf. Er ist zu den oberen Grundwasserstockwerken abgedichtet und fördert aus dem tiefer gelegenen Grundwasserstockwerk der Grundwasserpotentialfläche Ruppertsburg/Ober-Schmitten (Abb. 6-19, CD Anl. 2). Eine Beeinflussung der Messstelle Lauter ist somit auch durch den Brunnen Wetterfeld 2 nicht gegeben.

**Zone der Durchgehenden Grundwassersättigung**

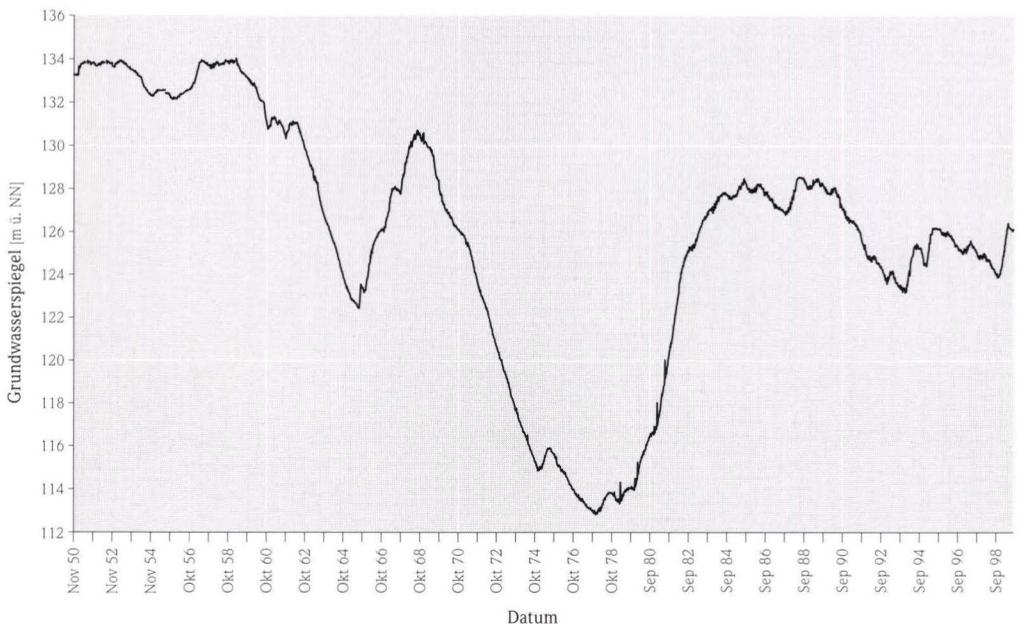
Die 50,60 m tiefe Landesgrundwasserdienstmessstelle Villingen (Abb. 6-30) befindet sich am östlichen Ortsrand von Villingen im Horlofftal (Bl. 5419 Laubach, R 349558, H 559659). Sie wurde 1913 gebaut und hat einen Durchmesser von 250 mm. Die Messstelle befindet sich in der Verlängerung der östlichen Horloffgraben-Hauptstörung. Der Grundwasserspiegel der Messstelle wird der hydrogeologischen Zone der Durchgehenden Grundwassersättigung zugeordnet.

Im Jahresgang der Messstelle schwankt der Grundwasserspiegel im Zentimeter- bis Dezimeter-

Bereich, über mehrere Jahre sind Meterbeträge möglich. Deutlich zeichnen sich die Trockenphasen in der Mitte der 60er, in den 70er und zu Beginn der 90er Jahre ab. Im Gegensatz zur Messstelle Lauter erreicht die Messstelle Villingen ihr Ausgangsniveau, das vor den 70er Jahren bei ca. 133 m ü. NN liegt, nach den 70er Jahren nicht mehr. Sie stellt sich auf ein Niveau unter 129 m ü. NN ein.

Die annähernd NNE-SSW verlaufenden Hauptstörungen des Horloffgrabens wirken wie Dränungen auf das vom Vogelsbergkern nach Westen abströmende Grundwasser (Kap. 6.4.2.3). Die Grundwassermessstelle Villingen liegt im Wirkungsbereich der östlichen Horloffgraben-Hauptstörung. Es wird daher aufgrund der störungsbedingten hydraulischen Verbindung zwischen den Grundwasserstockwerken im direkten Störungsbereich von einem gemeinsamen Grundwasserspiegel ausgegangen. Die hydraulischen Kenngrößen der einzelnen Grundwasserstockwerke können dabei unterschiedlich sein.

Grundwassermessstellen, die in der Zone der Durchgehenden Grundwassersättigung stehen, wei-



**Abb. 6-30.** Wasserstandsganglinie der Landesgrundwasserdienstmessstelle Villingen (461009), wöchentlicher Messturnus.

sen keinen ausgeprägten Jahresgang der Ganglinie und keine starken Sprünge zwischen unterschiedlichen Grundwasserstockwerken auf, wie es in der Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke der Fall ist. Die Phasen der Grundwasserneubildung werden durch die überlagernden Grundwasserstockwerke, die schwebend sind, so weit abgepuffert, dass die Ganglinie langfristige Entwicklungen bei der Grundwasserneubildung wiedergibt.

Bei extremen Trockenphasen wie in den 70er Jahren kann es passieren, dass es im Bereich der oberen Grundwasserstockwerke der Zone der Durchgehenden Grundwassersättigung zu einer Trennung der Grundwasserstockwerke kommt und sich zeitweise zusätzliche schwebende Grundwasserstockwerke ausbilden. Dieser Fall wird in der Messstelle Villingen zwischen den Grundwasserpotenzialflächen Hungen/Ober-Schmitten und Inheiden/Unteres Niddatal beobachtet. Während bis zum Ende der 60er Jahre beide Grundwasserstockwerke zur Zone der Durchgehenden Grundwassersättigung gehörten, kam es in den 70er Jahren zu einer Trennung der Grundwasserstockwerke.

Nach Beendigung der Trockenphase in den 70er Jahren blieb es offensichtlich im Absenkungsbe-

reich der Brunnen des Wasserwerkes Inheiden bei der Trennung der Grundwasserstockwerke, so dass in diesem Bereich das Grundwasserstockwerk der Grundwasserpotenzialfläche Hungen/Ober-Schmitten das zurzeit tiefste schwebende Grundwasserstockwerk ist. Das Absinken des Ausgangsniveaus in der Grundwassermessstelle Villingen um ca. 5 m auf etwa 128 m ü. NN wird durch die hydraulische Ausgangssituation, die durch die Lage der Messstelle im Bereich der Horloffgraben-Störung bedingt ist, und durch die gesteigerte Grundwasserentnahme im Wasserwerk Inheiden erklärt. Die Horloffgraben-Störungen bedingen eine hohe vertikale Grundwasserdurchlässigkeit, die zum verstärkten Aussickern und einem damit einhergehenden lokalen Absinken der Grundwasseroberfläche führte. Beide Grundwasserstockwerke gehörten vor den 70er Jahren zur Zone der Durchgehenden Grundwassersättigung. Das Absinken der Grundwasseroberfläche im unteren Grundwasserstockwerk (Hungen/ Ober-Schmitten) führte zum Aussickern von Grundwasser aus dem oberen Grundwasserstockwerk (Inheiden/Unteres Niddatal) in das untere Grundwasserstockwerk. Die vormalig im Bereich der Störungen hydraulisch verbundenen Grundwasserstockwerke trennten sich.

#### **6.4.2.5 Auswirkungen von Grundwasserentnahmen in der Grundwasserstockwerksabfolge**

Für Grundwasserentnahmen aus einem mehrschichtigen Kluftgrundwasserleitersystem gelten die in Kap. 6.4.2.4 beschriebenen Grundsätze. Daraus folgt, dass eine Beeinflussung von Grundwasserkörpern, die über oder unter dem Entnahmestockwerk liegen, bei fehlendem hydraulischem Kontakt der Grundwasserstockwerke (z.B. durch einen bestehenden Sickerraum bei Trennung durch ungesättigte Gebirgsbereiche oder eine Grundwasser nicht leitende Schicht zwischen den Grundwasserstockwerken) ausgeschlossen ist.

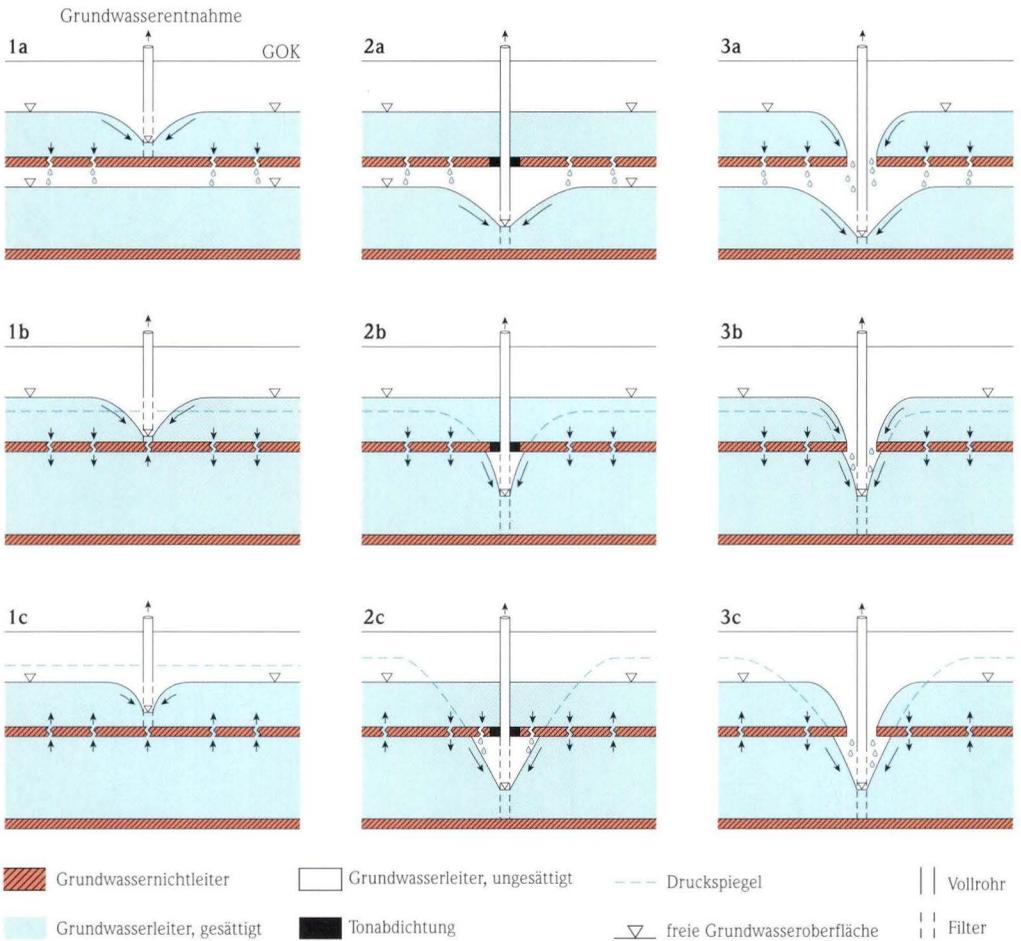
Wenn das Entnahmestockwerk unter einem Grundwasserstockwerk liegt, das durch Leckagen im hydraulischen Kontakt mit dem Entnahmestockwerk steht, findet eine Beeinflussung des höher gelegenen Grundwasserstockwerkes durch das

Aussickern von Grundwasser vom oberen Grundwasserstockwerk in das Entnahmestockwerk im Bereich des Absenktrichters statt. In Abhängigkeit von der Durchlässigkeit der Grundwasser leitenden Schicht zwischen den Grundwasserstockwerken bildet sich im oberen Grundwasserstockwerk ebenfalls ein mehr oder weniger großer Absenktrichter aus (Abb. 6-31).

Wenn sich das Entnahmestockwerk über einem Grundwasserstockwerk befindet, mit dem es nicht im hydraulischen Kontakt steht, kommt es zu keiner Beeinflussung des unterlagernden Grundwasserstockwerkes (Beispiel 1a in Abb. 6-31). Ist jedoch ein hydraulischer Kontakt vorhanden, ist eine Beeinflussung möglich (1b, c). Die natürliche Wasserbewegung vom unteren Grundwasserstock-

werk in das Entnahmestockwerk wird durch die Druckentlastung im Bereich des Absenktrichters verstärkt. Liegt die Potenzialfläche des unteren Grundwasserstockwerkes unter der Wasseroberfläche des überlagernden Entnahmestockwerkes (1b), ist entscheidend, ob die Absenkung bis in das Niveau der Potenzialfläche des unteren Grundwasserstockwerkes reicht. Wenn eine Absenkung stattfindet, die die Grundwasserpotenzialfläche des unteren Grundwasserstockwerkes nicht berührt, wird dieses durch die Entnahme auch nicht beeinflusst. Es findet weiterhin eine abwärts gerichtete Fließrichtung des Wassers

durch die gering leitende Schicht zwischen den Grundwasserstockwerken statt. Direkt unter dem Trichter führt der veränderte Druck jedoch zu einer Verringerung der Aussickerung vom oberen in das untere Grundwasserstockwerk. Wenn die Absenkung im Entnahmestockwerk bis unter die Druckfläche des unteren Grundwasserstockwerkes reicht, kommt es zu einer Umkehrung der Fließrichtung zwischen den Grundwasserstockwerken im Bereich des Trichters (1b). Der Druck des Wassers im unteren Grundwasserleiter ist dann größer als das hydrostatische Potenzial des Wassers aus dem Entnahmestockwerk. Wasser



**Abb. 6-31.** Schematische Darstellung von Grundwasserentnahmen in einem mehrschichtigen Grundwasserleitersystem.

fließt unter dem Absenktrichter vom unteren in das obere Grundwasserstockwerk. Wenn das Potenzial des unteren Grundwasserstockwerkes über der Grundwasseroberfläche des Entnahmestockwerkes liegt (1c), kommt es im Bereich des Absenktrichters zu einer stärkeren Zusickerung in das Entnahmestockwerk aus dem unteren Grundwasserstockwerk durch die Verringerung des Druckes im oberen Grundwasserstockwerk. Es wird so zum Teil Wasser aus dem unteren Grundwasserstockwerk mitgefördert.

Bei den Beispielen 2a–c (Abb. 6-31) wird Grundwasser aus dem unteren Grundwasserstockwerk gefördert. Der Brunnen ist gegenüber dem oberen Grundwasserstockwerk abgedichtet. Bei 2a kommt es zu keiner Beeinflussung des überlagernden Grundwasserstockwerkes durch die Grundwasserförderung. Beim Beispiel 2b kommt es zu einer Beeinflussung im Bereich des Absenktrichters, da das Potenzial im unteren Grundwasserstockwerk abgesenkt wird. Wenn das untere Potenzial über der Grundwasseroberfläche des oberen Grundwasserstockwerkes liegt (2c), kann es zu einer Umkehr der Fließrichtung zwischen den Grundwasserstockwerken im Bereich der Grundwasserförderung kommen. Wenn die Brunnenbohrung zum oberen Grundwasserstockwerk nicht abgedichtet wird (3a–c), fördert der Brunnen zum Teil Grundwasser aus dem oberen Grundwasserstockwerk. Es bestehen dann zwei übereinander liegende Absenktrichter. Auch hier kommt es zu einer Fließumkehr (3c).

Aufgrund dieser Zusammenhänge bedeutet die Grundwasserentnahme aus den Schichten des Vogelsberges, dass sich Auswirkungen, wie der Rückgang der Schüttung von Grundwasseraustritten oder sogar das Trockenfallen derselben, größtenteils auf das Entnahmestockwerk eingrenzen lassen. Dies gilt insbesondere für die Oberwaldzone und die Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke, da hier die meisten Grundwasserstockwerke nicht im hydraulischen Kontakt stehen. Findet, wie oben beschrieben, aufgrund besonderer hydraulischer Bedingungen dennoch eine Beeinflussung statt, sind fast ausschließlich nur die direkt an das Entnahmestockwerk angrenzenden Grundwasserstockwerke betroffen.

#### Beispiel 1

Ein Beispiel für die Beeinflussung von Grundwasseraustritten durch eine Grundwasserentnahme bieten die Brunnen nördlich von Mauswinkel (CD Anl. 5). Die Brunnen sind gegen Oberflächeneinflüsse mit einer bis zu 30,3 m mächtigen Tonabdichtung geschützt und weisen somit keine unmittelbare Anbindung an das oberste Grundwasserstockwerk Salz/Kirchbracht auf. Die im September 1994 gemessenen Grundwasserspiegel gehören zum Grundwasserstockwerk der Potenzialfläche Fischborn/Gedern (Abb. 6-20, CD Anl. 2), das die teilweise ergiebigen Grundwasseraustritte bei Mauswinkel speist. Bei einer Verfilterung bis zu 253 m ü. NN verbinden die Bohrlöcher mehrere Grundwasserstockwerke. Vom 23.11.1972 bis zum 22.12.1972 wurde ein Pumpversuch an den Brunnen Mauswinkel II, III und IV gefahren. Während des Pumpversuches stellten sich die Wasserspiegel der Brunnen Mauswinkel III mit 341,38 m ü. NN (Förderrate: 25,5 l/s) und Mauswinkel IV mit 343,45 m ü. NN (18,0 l/s) auf das Potenzial des Grundwasserstockwerkes Fischborn/Kirchbracht ein, das unter der Grundwasserpotenzialfläche Fischborn/Gedern liegt. Der Brunnen Mauswinkel II wies bei einer Pumpenleistung von 12,5 l/s mit 317,91 m ü. NN das tiefste Niveau der drei Brunnen auf. Ob es sich hierbei um einen Mischwasserspiegel oder um ein eigenständiges Niveau handelt, bleibt unklar. Der Betrieb der Brunnen, die nur wenige 100 m im Grundwasseranstrom desselben Grundwasserstockwerkes wie das des Quellgebietes Mauswinkel liegen, muss bei einer Aufnahme der Förderung zwangsläufig zu einem Rückgang der Schüttung oder sogar zum Ausfall der Grundwasseraustritte führen. Bei den Pumpversuchen wurde eine Beeinflussung anderer Grundwasserstockwerke nicht festgestellt.

#### Beispiel 2

Die Grundwasserförderung aus dem Brunnen Michelnaun, der rd. 2,0 km nordöstlich der Stadt Nidda liegt, hat zu einem stufenweisen Absinken des Grundwasserspiegels im Brunnen geführt. Zeigte er zu Beginn der Grundwasserförderung noch den Grundwasserspiegel eines oberen Grundwasserstockwerkes (ca. 150 m ü. NN, Grundwas-

serpotenzialfläche Hungen/Ober-Schmitten, Abb. 6-18, CD Anl. 2), so stellte sich mit der Zeit ein Grundwasserspiegel um 130 m ü. NN (Grundwasserpotenzialfläche Inheiden/Unteres Niddatal) ein. Das Grundwasserstockwerk der Potenzialfläche Inheiden/Unteres Niddatal ist der Zone der Durchgehenden Grundwassersättigung zuzurechnen. Die darüber liegenden Grundwasserstockwerke gehören zur Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke. Das tiefste schwebende Grundwasserstockwerk (Hungen/Ober-Schmitten, ca. 150 m ü. NN) wird aufgrund einer fehlenden Abdichtung durch eine direkte Abflussmöglichkeit von Grundwasser im Bohrloch in geringem Umfang mit genutzt und somit beeinflusst. Die über diesem Grundwasser-

stockwerk liegenden schwebenden Grundwasserstockwerke (Rainrod/Eichelsdorf, ca. 165 m ü. NN, Fauerbach, ca. 180 m ü. NN) werden durch die Förderung von Grundwasser aus dem Brunnen Michelnau nicht beeinflusst. Nach Aussagen von Ortsansässigen sind die Schüttungen von Quellen, die aus diesen Grundwasserstockwerken gespeist werden, nach Inbetriebnahme des Brunnens im Jahre 1977 nicht merklich zurückgegangen. Der Ausfall von Quellen im Bereich des Hohensteins ist auf die Entwässerung durch den Basaltsteinbruch am Hohenstein zurückzuführen. Messungen im Februar 1995 ergaben eine Entwässerungsrate von 7–8 l/s. Große Schwankungen treten nach Aussagen des Betriebsführers nicht auf.

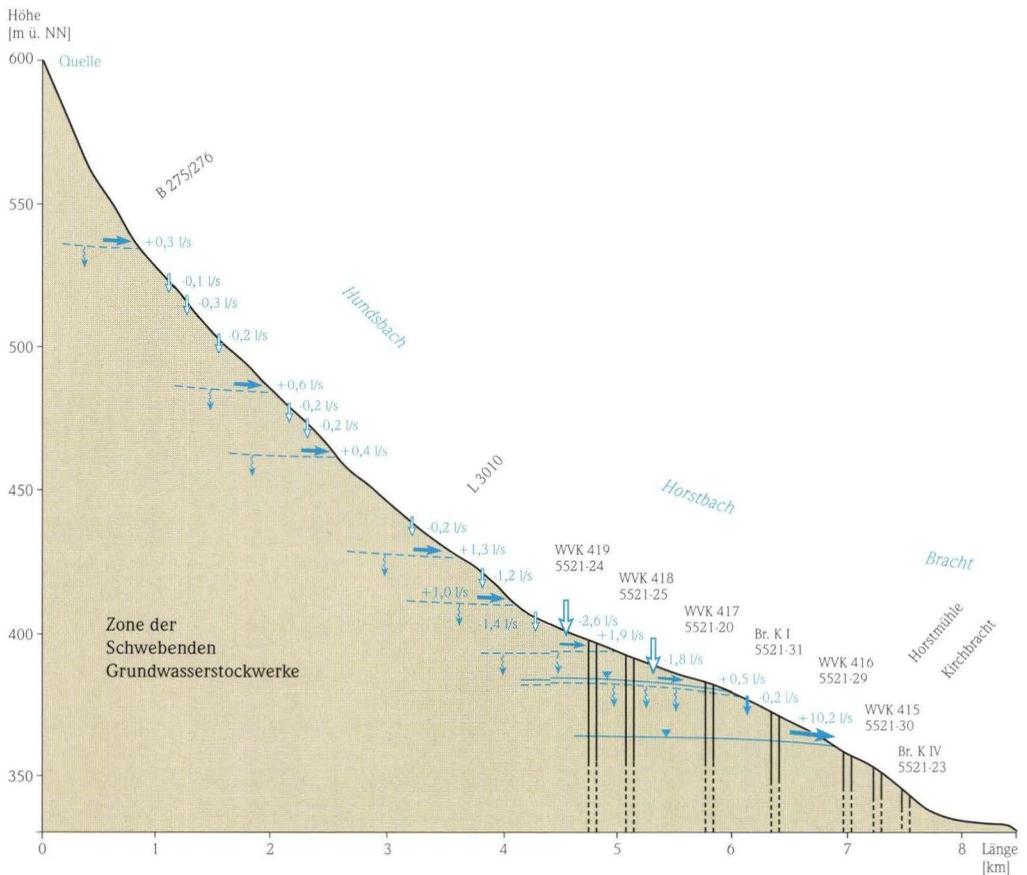


Abb. 6-32. Abflussprofil Hundsbach/Horstbach/Bracht (Leßmann et al. 2000).

## **6.5 Einfluss des Grundwasserstockwerksbaues auf den Abfluss von Fließgewässern**

### **6.5.1 Abflussprofil Hundsbach/Horstbach/Bracht**

Abflussänderungen im Verlauf eines Fließgewässers spiegeln den hydrogeologischen Bau des vulkanischen Kluftgrundwasserleitersystems wider. Die Abflüsse charakterisieren durch ihre räumliche Abfolge und ihre Schwankungsbreite die Hydrologie der Grundwasserkörper und geben Aufschluss über die hydraulische Anbindung der Vorflut an die Grundwasserstockwerke. Dies wird besonders zurzeit von Niedrigwasserabflüssen deutlich, da der oberirdische Abfluss dann überwiegend aus dem Grundwasser gespeist wird.

Als Beispiel für die räumlichen Abflussänderungen im Verlauf eines Vorfluters wurde am 10. und 11.9.1994 das oberste Teilabflusssystem der Bracht, bestehend aus einer Teilstrecke, die in ihrem Verlauf die Namen Hundsbach, Horstbach und Bracht trägt (Abb. 6-32), als Abflussprofil über eine Gewässerlänge von annähernd 8 km gemessen. Die Distanz zwischen den einzelnen Abflussmessstellen liegt bei rd. 200 m.

Die Quelle des Hundsbaches befindet sich rd. 750 m südwestlich von Herchenhain. Sie liegt damit außerhalb der Oberwaldzone in der Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke. Die Abflussmessstrecke verläuft von Herchenhain in Nord-Süd-Richtung bis zur Ortschaft Kirchbracht. Ab dort fließt die Bracht weiter in südliche Richtung und mündet bei Wächtersbach mit einem mittleren Abfluss (MQ) von rd. 1500 l/s in die Kinzig.

Die oberen rd. 500 m des Baches waren während der Messungen zum Abflussprofil trocken gefallen. Nur vereinzelte kleine Pfützen und feuchte bis nasse Sedimente im Bachbett deuteten auf eine Wasserführung hin. Erst ab der Messstelle H5 war bei einem Abfluss von 0,3 l/s ein durchgehendes Wassergerinne vorhanden. Der Abfluss nahm im weiteren Verlauf des Fließgewässers erst leicht und dann deutlich zu. Ab dem Kilometer 3,6 kam es zu starken Schwankungen mit Abflussabnahmen bis zu 2,6 l/s und Abflusszunahmen bis maximal 1,9 l/s. Ab der Messstelle H40 (Kilometer 7,0), die oberhalb der Horstmühle liegt, waren über eine

Gewässerstrecke von rd. 800 m Grundwasserzutritte von über 10 l/s zu verzeichnen. Der Abfluss des Baches stieg hier auf das 10-fache an.

Die elektrische Leitfähigkeit nahm nach der Einleitung von Abwässern im Oberlauf durch den Zutritt gering mineralisierter Wasser kontinuierlich ab (Abb. 6-33). Der Zufluss Z2 ist ein Nebenbach des Hundsbaches, der von Osten aus Richtung der Ortschaft Volkartshain zufließt. Die organoleptische Prüfung des Wassers und die im Vergleich zum Bachwasser (um die 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) erhöhte elektrische Leitfähigkeit von 235  $\mu\text{S}/\text{cm}$  lassen auf einen Abwasseranteil im Nebenbach schließen. Die nachfolgenden Zuflüsse zum Bach stammen zu meist aus flächigen Nassstellen, deren Schüttungen zwischen 0,1 und 1,3 l/s lagen. Der Zufluss Z3 ist ein Einzelquellaustritt, der sich unmittelbar neben dem Bach befindet. Die Quelle schüttete 0,2 l/s und hatte eine elektrische Leitfähigkeit von 79,9  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

In der Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke wechseln durchlässige bis stark durchlässige Gesteinspartien mit solchen, die Grundwasser gering leitend oder Grundwasser nicht leitend sind. Über den gering leitenden Schichten bilden sich Grundwasserkörper aus, die neben der flächigen Grundwasserneubildung in den oberirdischen Einzugsgebieten auch durch die Infiltration von Wasser aus den Fließgewässern gespeist werden. Grundwasser gesättigte Gesteinspartien führen der Vorflut Wasser zu, während Grundwasser leitende, aber ungesättigte Schichten zu Abflussabnahmen führen. Da im Bereich der Schwebenden Grundwasserstockwerke keine oder eine nur sehr geringe Kolmation des steinigen Gewässerbettes durch sedimentäre Feststoffe besteht, kann eine Versickerung oder Versinkung weitgehend ungehindert geschehen.

Das Abflussprofil Hundsbach/Horstbach/Bracht (Abb. 6-32, 6-33) ist beispielhaft für das räumliche Abflussverhalten eines Fließgewässers in der Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke. Der Abfluss des Baches schwankt über die gesamte

Messstrecke erheblich. Die Abflusszuwächse erreichten z.T. ein Mehrfaches des oberstromigen Abflusses. Je niedriger ein Gewässerabschnitt im hydrogeologischen Gesamtsystem liegt, desto größer kann sein Einzugsgebiet und desto größer können

die Abflusszuwächse sein. Das Abflussprofil zeigt, wie kleinräumig die Wechsel zwischen Wasser gesättigten und Wasser ungesättigten Zonen bzw. zwischen effluenten und influenten Bedingungen sind.

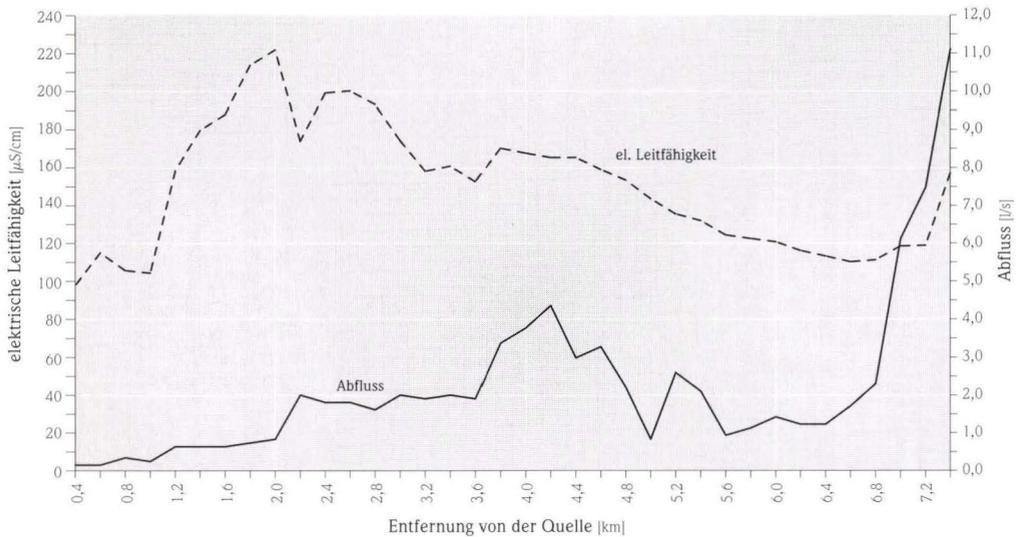


Abb. 6-33. Elektrische Leitfähigkeit und Abfluss des Abflussprofils Hundsbach/Horstbach/ Bracht.

### 6.5.2 Trockenfallstrecken

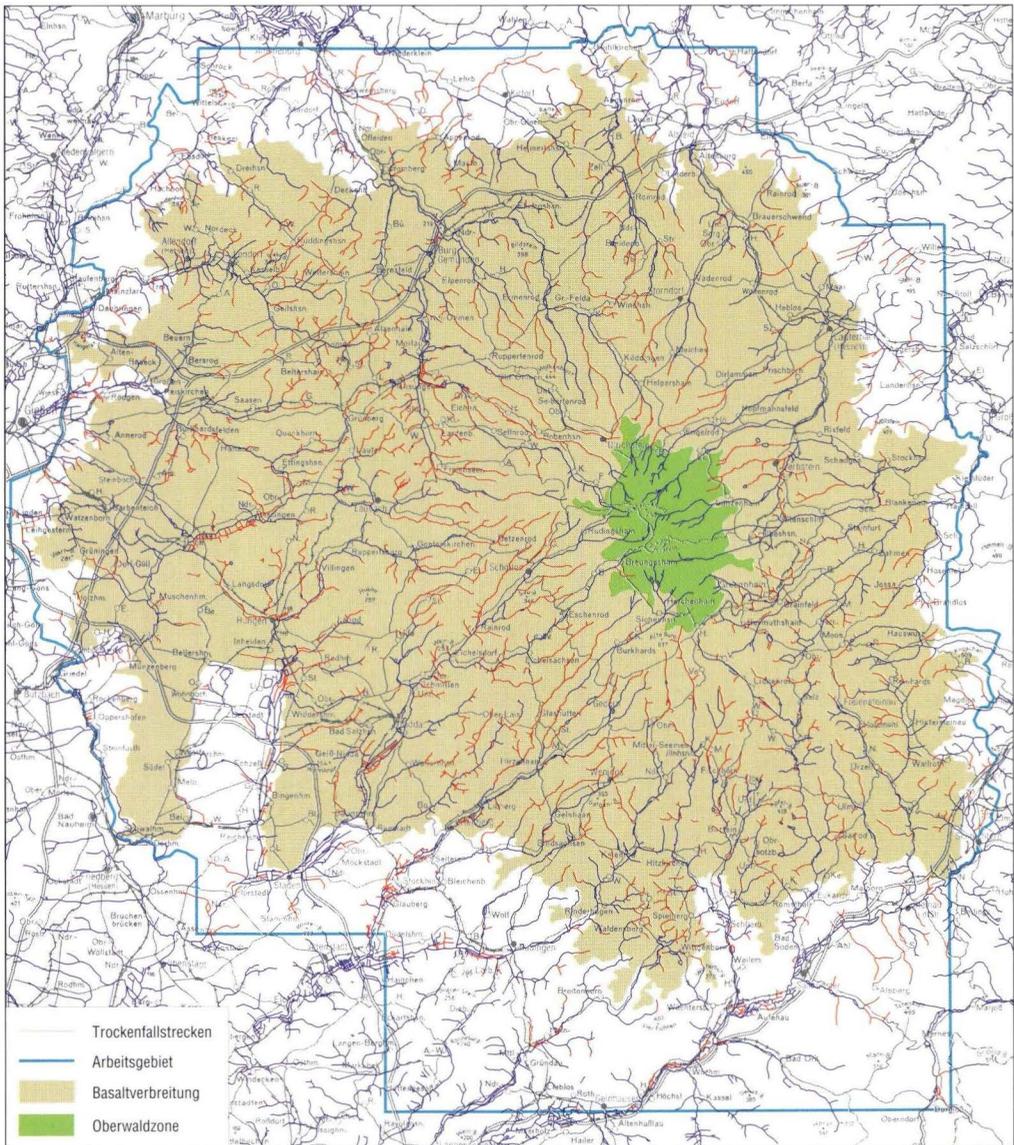
Da die basaltischen Grundwasserleiter über ein zumeist geringes Retentionsvermögen verfügen, sind große Schwankungen bei den Abflüssen der Vorfluter zu beobachten. HQ-Werte können direkt mit Jahreszeiten hoher Niederschlagsintensität korreliert werden. Im Sommerhalbjahr, und hier besonders im Spätsommer, nimmt der Anteil der Infiltration aus den Fließgewässern an der Grundwasserneubildung in die sich leerenden Grundwasserspeicher gegenüber der flächigen Grundwasserneubildung bei gleichzeitiger Abflussabnahme zu. Die meteorologischen und die hydrogeologischen Regimefaktoren führen bei einem großen Teil der Bäche in der Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke im ausgehenden hydrologischen Sommerhalbjahr zum Trockenfallen. Je geringer der Abfluss und je

kleiner das Einzugsgebiet eines Vorfluters, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass es zum Trockenfallen kommt. Die Karte der Trockenfallstrecken (Abb. 6-34, CD Anl. 6) macht deutlich, dass es sich nicht um vereinzelte, lokale Erscheinungen handelt, sondern dass dieses Phänomen seine Ursache in den geologischen Gegebenheiten des Vogelsberges und damit in dem Wechsel von Grundwasser leitenden mit Grundwasser gering leitenden Schichten hat.

Die Karte der Trockenfallstrecken (Abb. 6-34, CD Anl. 6), deren Kartierung in dem extrem niederschlagsarmen Jahr 1976 von den Wasserwirtschaftsämtern Hanau, Friedberg und Marburg durchgeführt wurde und die durch Arbeiten des HlFB in den Spätsommern der Jahre 1994 und 1995 ergänzt wurde, zeigt, dass es in hydrologi-

schen Sommerhalbjahren im gesamten vulkanischen Untersuchungsgebiet zum Trockenfallen von Fließgewässern kommt. Die am Gewässerabschnitt Hundsbach/Horstbach/Bracht gemachten und oben beschriebenen Beobachtungen (Kap. 6.5.1, Abb. 6-32, 6-33) lassen sich auf alle Fließ-

gewässer des Vogelsberges übertragen. Der Bach war 1976 bis zur Messstelle H25, also den obersten rd. 4,3 km, trocken gefallen. Die überlagernden schwebenden Grundwasserstockwerke, die 1994 noch Abflusszuwächse bis zu 0,8 l/s hatten, waren in dem extremen Trockenjahr soweit ge-



**Abb. 6-34.** Trockenfallstrecken.

leert, dass im Bereich des Hundsbaches und des oberen Horstbaches kein Abfluss mehr stattfand.

Entscheidend für das Trockenfallen eines Vorfluters sind die Lage des ursprünglichen Quellgebietes, im weiteren Verlauf die hydraulische Anbindung des Vorfluters an die Grundwasserstockwerke sowie deren Positionen im hydrogeologischen Gesamtsystem und die hydrologischen Eigenschaften des jeweils betroffenen Grundwasserstockwerkes.

### **Oberwaldzone**

In der Oberwaldzone fallen selbst bei extremen Trockenphasen nur im Randbereich vereinzelt Gewässerabschnitte trocken. Neben den ganzjährig Wasser führenden Bächen weist die Oberwaldzone eine sehr hohe Zahl von Grundwasseraustritten (241) auf; die größte Grundwasseraustrittsdichte (2,8 GWA/km<sup>2</sup>) des Untersuchungsgebietes wird im Hohen Vogelsberg erreicht (Kap. 6.3.1).

Flusssysteme, deren Ursprungsquellgebiet in der Oberwaldzone liegt und die bereits ab der Oberwaldzone über einen relativ hohen Abfluss verfügen, durchfließen die Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke zumeist ohne trocken zu fallen. Ist die potenzielle Menge des Wassers, das im Gebiet der schwebenden Grundwasserstockwerke schwindet, größer als die Summe des aus der Oberwaldzone abfließenden und aus schwebenden Grundwasserstockwerken zufließenden Wassers, fallen auch solche Vorfluter über Teilstrecken trocken. Die Nidda und der Eichelbach sind im westlichen Vogelsberg die einzigen Beispiele für Fließgewässer, die im Spätsommer 1976 noch Wasser führten. Ohm, Rauchel, Streitbach, Seembach, Horloff, Hillersbach, Nidder, Seembach und Bracht fielen im Bereich der Schwebenden Grundwasserstockwerke ganz oder teilweise trocken. Das Wasser versickert oder versinkt in die ungesättigten, Grundwasser leitenden Gesteine. Je geringer die Grundwasserneubildung in den voraus gegangenen Monaten – und hierbei besonders im Winterhalbjahr – war, desto mehr Wasser versickert aus den Vorflutern in den Untergrund.

### **Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke**

Bachläufe, deren Quellgebiete in der Zone der

Schwebenden Grundwasserstockwerke liegen und die über eine Zusickerung aus der Oberwaldzone (Typ 2A, Abb. 6-9) verfügen, fielen über Teilstrecken trocken. Das in der Oberwaldzone kontinuierlich versickernde Wasser speist unterlagernde Grundwasserstockwerke. Mit zunehmender Größe des oberirdischen Einzugsgebietes führten einige dieser Bäche wieder Wasser. Ein Beispiel hierfür ist der oben beschriebene Oberlauf der Bracht mit Hundsbach und Horstbach. Im Oberlauf sind die durch das Bachbett angeschnittenen Grundwasserkörper nicht ergiebig genug, um bei großer Trockenheit Wasser in ausreichender Menge an den Vorfluter abzugeben. Erst oberhalb der Horstmühle verfügen die dortigen Grundwasserstockwerke über einen ausreichenden Wasservorrat bzw. sickert den Grundwasserstockwerken aus überlagernden Schichten genug Wasser zu, um eine ganzjährige Schüttung zu gewährleisten.

Die Fließgewässer, deren Quellgebiete in der Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke liegen, die aber über keine Zusickerung aus der Oberwaldzone (Typ 2B) verfügen, fielen ausnahmslos trocken. Die oberirdischen und unterirdischen Einzugsgebiete beschränken sich auf die kleinräumigen Basaltrüben, die eigenständige hydrologische Systeme sind. Der Läunsbach ist hierfür beispielhaft. Er mündet aus östlicher Richtung in die Niddatalperre. Das unterirdische Einzugsgebiet ( $A_{Eu}$ ) des Läunsbaches besteht aus 2B-Grundwasserstockwerken, die bei Trockenwetterperioden leer laufen. Der Läunsbach hat deshalb regelmäßig nach niederschlagsarmen Zeiten im Spätsommer bzw. im Frühherbst keinen Abfluss.

Während der extremen Trockenzeit Mitte der 70er Jahre war der zweite Zulauf zur Niddatalperre, die Nidda am Pegel Schotten 1, ebenfalls trocken gefallen. Das unterirdische Einzugsgebiet ( $A_{Eu}$ ) setzt sich aus 2A- und 2B-Grundwasserstockwerken zusammen. Die Oberwaldzone und 2A-Grundwasserstockwerke weisen im Regelfall einen ganzjährigen Abfluss auf. Mehrjährige extreme Trockenperioden können jedoch zu einer erheblichen Reduktion der Abflüsse führen. Hoch gelegene 2A-Grundwasserstockwerke laufen dann ebenso leer wie 2B-Grundwasserstockwerke.

### **Zone der Durchgehenden Grundwassersättigung**

Quellgebiete in der Zone der Durchgehenden Grundwassersättigung weisen auch während extremer Trockenphasen eine Schüttung auf. Die Speicherkapazität des Gesteins und die Größe der Einzugsgebiete führen zu einer nahezu gleich bleibenden Schüttung. Sie haben keinen ausgeprägten Jahresgang, wie es in der Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke der Fall

ist. Die Phasen der Grundwasserneubildung werden durch die überlagernden Grundwasserstockwerke, die schwebend sind, so weit abgepuffert, dass die Schüttungen langfristige Entwicklungen bei der Grundwasserneubildung wiedergeben. Wie beim Aderborn im Wassergewinnungsgebiet Fischborn kann die Quellschüttung aber auch eine bemerkenswerte Konstanz aufweisen.

## **6.6 Grundwasserfließrichtungen**

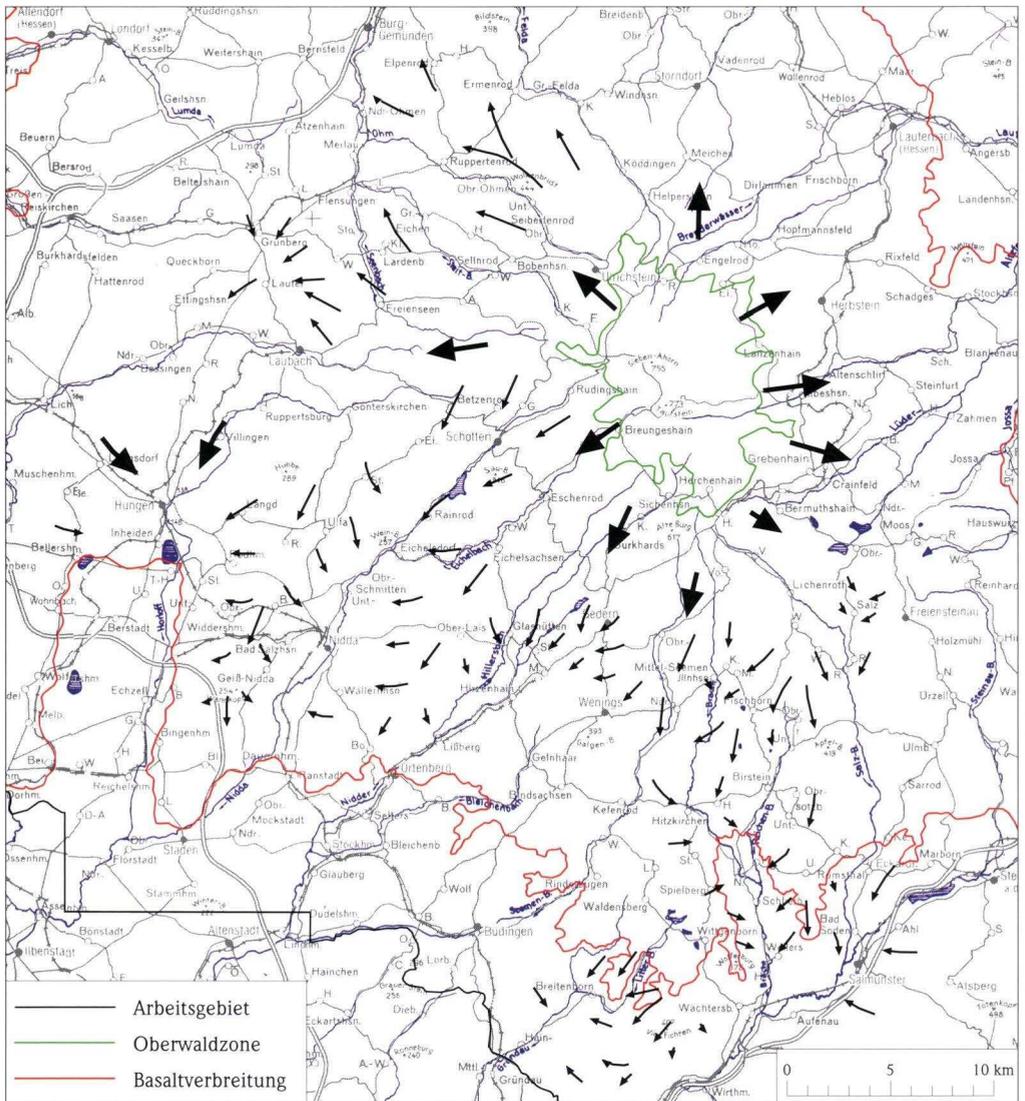
Die Grundwasserfließrichtung in einem Grundwasserstockwerk hängt von der Lage des Grundwasserstockwerkes im hydrogeologischen Gesamtsystem ab. Die Zusicke- rung aus dem Einzugsgebiet Oberwald und dessen Anteil an der Grundwasserneubildung sind neben den geologischen Voraussetzungen die wesentlichen Faktoren für die hydraulischen Potenziale und damit für die Grundwasserfließrichtung in den Grundwasserstockwerken. Abb. 6-35 gibt generelle Grundwasserfließrichtungen für die hydrogeologische Zone der Durchgehenden Grundwassersättigung wieder. Als Übersicht sind undifferenzierte, nicht nach einzelnen Grundwasserstockwerken untergliederte Grundwasserstromlinien dargestellt.

Das Grundwasser kann in den einzelnen Grundwasserstockwerken abweichend oder entgegen der Hauptfließrichtung strömen. Dies gilt insbesondere für die schwebenden Grundwasserstockwerke, die keine Zusicke- rung aus der Oberwaldzone (Typ 2B) besitzen. Die schwebenden Grundwasserstockwerke der hydraulisch eigenständigen Basaltrücken entwässern entsprechend Einfallen und Streichen entweder der stärker durchlässigen Gesteinspartien in der vulkanischen Abfolge oder der Grundwasser gering leitenden Schichten, über denen sich Grundwasserkörper in Grundwasser leitenden Gesteinen ausgebildet haben (Kap. 6.4.2).

Bei 2A-Grundwasserstockwerken fließt das Grundwasser vom zentralen Vogelsberg zu den Randbereichen des Vulkangebietes. Die Hauptfließrichtungen dieser Grundwasserstockwerke entsprechen den in Abb. 6-35 schematisch wiedergegeben Fließrichtungen. Der Anteil des

aus dem Kern des Vogelsberges unterirdisch abfließenden Wassers nimmt in den Grundwasserstockwerken der Basaltrücken im Abstrom der höchst gelegenen Grundwasseraustritte eines Grundwasserstockwerkes kontinuierlich ab. Bei gleich bleibender hydraulischer Leitfähigkeit des Gesteins eines schwebenden Grundwasserstockwerkes ist daher der Bereich der dem Oberwald am nächsten gelegenen Grundwasseraustritte zu- meist der ergiebige. In dem Grundwasserstockwerk bildet sich ein Potenzialgefälle in Richtung auf die Grundwasseraustritte aus; die Grundwasserfließrichtung des betreffenden Grundwasserstockwerkes stellt sich auf die Grundwasseraustritte ein. Je nach Durchlässigkeit der Gesteine und der jeweiligen hydraulischen Situation kann das Grundwasserstockwerk zeitweise zum Teil oder sogar vollständig entwässern. Im Extremfall hat die Grundwasser leitende Schicht unterhalb der Grundwasseraustritte dann nur noch ein stark eingeschränktes, lokales Einzugsgebiet. Aus einem schwebenden Grundwasserstockwerk mit Zusicke- rung aus der Oberwaldzone (Typ 2A) wird auf diese Weise ein Grundwasserstockwerk, das gleiche hydrogeologische Eigenschaften hat wie die oben genannten 2B-Grundwasserstockwerke.

Wenn ein Grundwasserstockwerk bzw. dessen Sohl- schicht in derselben Höhenlage wie das Ero- sionsniveau eines Tales liegt, kann das Tal ent- weder wie eine hydraulische Barriere wirken oder die Ausrichtung der Grundwasserpotenziale und damit die Grundwasserfließrichtung in dem Grundwasserstockwerk beeinflussen. Dies gilt für die schwebenden Grundwasserstockwerke ebenso wie für



**Abb. 6-35.** Allgemeine Grundwasserfließrichtungen in der Zone der Durchgehenden Grundwassersättigung.

die Grundwasserstockwerke, die sich in der Zone der Durchgehenden Grundwassersättigung befinden. Deshalb sind die Lage der Täler zum zentralen Vogelsberg, ihr Verlauf und die Tiefe des Erosionseinschnittes von besonderer Bedeutung.

Täler wirken wie hydraulische Barrieren (Abb. 6-36), wenn die Talsohle die Grundwassersohlschicht eines Grundwasserstockwerkes schneidet.

Bei diesen Grundwasserstockwerken, deren Grundwasserfließrichtung im Vogelsberg zumeist spitzwinkelig auf das Tal zuläuft, tritt im Grundwasserzuström-Bereich des Tales Wasser zu Tage. Die Grundwasseraustritte bilden überwiegend Quell-Linien, die zumeist nur einseitig im Tal vorhanden sind. Im Grundwasser-Abstrom-Bereich ist die Ergiebigkeit des Grundwasserstockwerkes durch die

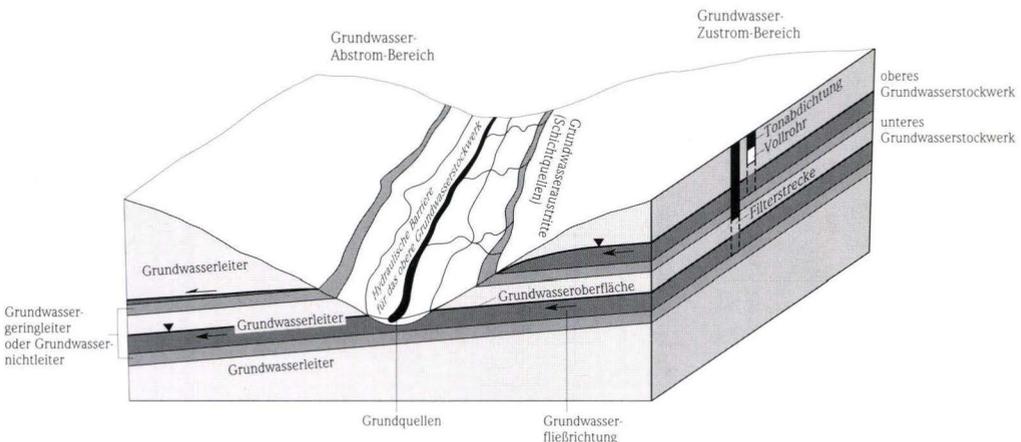
Trennung von einem Teil des potenziellen Einzugsgebietes erheblich verringert.

Die Lauter im westlichen Vogelsberg ist hierfür beispielhaft. Sie fließt von Weickartshain durch die Ortschaft Lauter und mündet bei Wetterfeld in die Wetter. Im Sommer fällt der Oberlauf der Lauter regelmäßig nach längeren niederschlagsarmen Phasen trocken (Abb. 6-34). Erst im Bereich des Wasserwerkes Lauter schneidet das Tal zwei ergiebige Grundwasserstockwerke, deren Wasser mit den Hauptzuflussrichtungen Ost bzw. Südost dem Tal zufließt. Das oberste Grundwasserstockwerk entwässert an der südlichen Talschulter unterhalb des Wirtschaftsweges von Lauter nach Weickartshain durch eine größere Zahl von Grundwasseraustritten. Die nördliche Talschulter ist dagegen weitgehend trocken und zeigt damit, dass das Tal eine hydraulische Barriere für dieses Grundwasserstockwerk ist. Das direkt unterlagernde Grundwasserstockwerk entwässert in die Talsedimente und tritt dem Vorfluter in Form von Grundquellen zu.

Bei der Bracht und dem Riedbach in Höhe der Ortschaften Kirchbracht und Mauswinkel verläuft die Grundwasserfließrichtung annähernd parallel zu den Nord-Süd-verlaufenden Bächen. In den Tälern kommt es im Bereich der Unterschneidung der Grundwasseroberfläche durch die Geländeoberfläche zu starken Grundwasseraustritten, die

den Abfluss der Vorfluter deutlich ansteigen lässt.

Ähnliche hydraulische Verhältnisse liegen im Bereich des Wassergewinnungsgebietes Gedern/Merkenfritz vor. Während das Wasser des Grundwasserstockwerkes der Grundwasserpotenzialfläche Gedern/Merkenfritz III durch die Morphologie unbeeinflusst mit zum Kern des Vogelsberges konzentrisch verlaufenden Grundwasserpotenzialen in südliche Richtung fließt, werden die beiden überlagernden Grundwasserstockwerke der Potenzialflächen Gedern/Merkenfritz II und Gedern/Merkenfritz I durch den Talanschnitt des Merkenfritzer Baches mit abnehmender Entfernung zum Taltiefsten immer stärker beeinflusst. Das oberste Grundwasserstockwerk liegt oberhalb des Erosionsniveaus von Merkenfritzer Bach und Schweinsgraben. Im Basalrücken, der südwestlich des Haupttales liegt, findet der Zustrom aus ostnordöstlicher Richtung statt. Dies führt zu Grundwasseraustritten an der südöstlichen Talflanke des Merkenfritzer Baches. Im Talbereich kommt es zu starken Vernässungen. Auch die Grundwasseraustritte östlich von Merkenfritz, die mehrere Fischteiche speisen, sind diesem Grundwasserstockwerk zuzuordnen. Auf der gegenüberliegenden Talseite sind dagegen kaum Vernässungen zu beobachten, da dort das Grundwasser annähernd talparallel fließt. Vereinzelt zeigen jedoch, dass das Grundwasserstockwerk auch in diesem Bereich existiert.



**Abb. 6-36.** Die Wirkung eines Taleinschnittes mit Vorflutfunktion als hydraulische Barriere.

Der Nidda kommt im vulkanischen Vogelsberg als Vorfluter eine besondere Bedeutung zu, da sie im westlichen Vogelsberg, bezogen auf die Nähe zum zentralen Teil des Vulkangebirges, das für mehrere Grundwasserstockwerke tiefste Erosionsniveau ist (Abb. 6-18). Im nordwestlichen Teil des Vogelsberges liegt die Geländeoberfläche etwa doppelt so hoch wie im südwestlichen Vogelsberg. Die Quellgebiete im Niddatal zwischen Rainrod und Ober-Schmitten liegen bei ca. 150 bis 170 m ü. NN.

In etwa der gleichen Entfernung vom Oberwald befinden sich im nordwestlichen Teil des Vogelsberges die Quellgebiete Ober-Ohmen und Groß-Eichen im Höhenniveau zwischen 270 und 300 m ü. NN (Abb. 6-16). Die Nidda schneidet daher in ihrem Verlauf als tiefst eingeschnittener Vorfluter die einzelnen Grundwasserstockwerke, deren Wasser mit einer aus Nordost kommenden Fließrichtung vom Zentrum des Vogelsberges zufließt, als Erste. Bei annähernd gleich bleibender hydraulischer Leitfähigkeit der Gesteine eines Grundwasserstockwerkes sind die höchstgelegenen Grundwasseraustritte eines Grundwasserstockwerkes oft die ergiebigsten. Im Niddatal führte dies zu Bereichen mit extremen Vernässungen. Die ehemaligen Niedermoore im mittleren Niddatal sind hierfür Beispiele.

Das tiefst gelegene und ergiebigste Quellgebiet des vulkanischen Vogelsberges liegt ebenfalls im südwestlichen Teil des Arbeitsgebietes bei Inheiden. Ihm wird eine ähnliche hydraulische Stellung im Gesamtsystem Vogelsberg zugeordnet wie dem Niddatal. Für das vom Vogelsbergkern nach Westen abströmende Grundwasser sind die annähernd NNE-SSW verlaufenden Hauptstörungen des Horloffgrabens Dränungen. Der Verlauf der Grundwasserpoteziale (Abb. 6-17, CD Anl. 2) zeigt, dass sich die Grundwasserfließrichtung in den betroffenen Teilbereichen der Grundwasserstockwerke (Grundwasserpotenzialflächen Inheiden/Unteres Niddatal, Hungen/Ober-Schmitten und Ruppertsburg/Ober-Schmitten) auf das Störungssystem eingestellt hat. Der Verlauf der Grundwasserpoteziale und die Existenz verschiedener Grundwasserstockwerke lässt vermuten, dass es sich nur um wenige Hauptstörungen handelt, die in direkter Verlängerung der Horloffgraben-Schultern nach Norden über die

Wetter hinaus reichen. Da sich über den drei genannten Grundwasserstockwerken noch weitere befinden und sich deren Grundwasserstromlinien nicht durch die Störungen beeinflusst zeigen, wird von einer kurzzeitigen, intravulkanischen Entstehung des Horloffgrabens ausgegangen. Die jüngeren Lavaströme flossen über das Störungssystem hinweg und weisen damit keine direkte hydraulische Anbindung zu demselben auf.

Nach Ehrenberg & Hickethier (1985) ist der Horloffgraben eine flachgründige Struktur, deren präbasaltische Schichten in Fazies und Mächtigkeit nicht von den außerhalb des Grabens liegenden Abfolgen abweichen. Bohrergebnisse, die von Schenk (1957) veröffentlicht wurden, zeigen dies deutlich. Ehrenberg & Hickethier (1985) gehen davon aus, dass intrabasaltisch, zumindest aber postbasaltisch (voroberpliozän), ein relatives Herausheben des Horloffgrabens erfolgt sein muss. Hierdurch soll es zu einer stärkeren Abtragung der Vulkanitüberdeckung im Horloffgebiet gegenüber den Nachbarschollen gekommen sein. Ab dem Oberpliozän sei dann wiederum eine Bewegungs-umkehr erfolgt, so dass die Basaltbasis auf ihr ursprüngliches Niveau herabsank.

Die hydrogeologische Auswertung in der nördlichen Verlängerung des Horloffgrabens lässt jedoch vermuten, dass es zu keiner Aufeinanderfolge von Hebung und Senkung im Bereich des Grabens gekommen ist. Das Horloffgrabensystem wurde hiernach intravulkanisch angelegt und weist nur eine geringfügige Relativbewegung gegenüber den angrenzenden Schollen auf. Innerhalb der bereits abgelagerten und der während der Anlage des Grabens ausströmenden Basalte entstanden Störungen mit einer NNE-SSW Erstreckung, die in der Verlängerung der Horloffgrabenstörungen liegen. Diese Störungen wirken für das aus dem zentralen Vogelsberg in westlicher Richtung strömende Grundwasser wie Dräne. Der jahreszeitlich unabhängige und daher gleich bleibend hohe Basisabfluss, zurzeit etwa 700 l/s bei einem Niederschlag von durchschnittlich 1200 mm/a im Hohen Vogelsberg, hat zu einer verstärkten fluviatilen Erosion im Abflussbereich des Grabens geführt. Lavaströme, die bis in den Bereich des Horloffgrabens vordrangen, wurden so z.T. rasch wieder abgetragen. Von

Schenk (1957) beschriebene Beobachtungen, wie die Braunkohlebildungen in den nicht basaltischen Tertiärschichten oder die ungleichmäßige Verteilung von Sanden mit teilweise großen Mächtigkeiten im Horloffgraben, lassen sich ebenfalls durch eine erhöhte fluviatile Tätigkeit in Abhängigkeit von den in diesem Gebiet erfolgten tektonischen Vorgängen deuten.

ten im Horloffgraben, lassen sich ebenfalls durch eine erhöhte fluviatile Tätigkeit in Abhängigkeit von den in diesem Gebiet erfolgten tektonischen Vorgängen deuten.

## 7. Wassergewinnung

### 7.1 Wassergewinnungsanlagen

Im Arbeitsgebiet wurden 980 Wassergewinnungsanlagen (WGA) recherchiert (CD Anl. 2, Anl. 3). Diese gliedern sich in 596 Brunnen (60,8%), 381 Quelfassungen (38,9%), 2 Stollen (0,2%) und 1 Quellungalerie (0,1%). Die genauen Zahlen liegen wahrscheinlich deutlich darüber, da insbesondere private Kleinnutzer, wie die Besitzer von Ferienhäusern oder auch landwirtschaftliche Betriebe, zum Teil über eigene Wassergewinnungsanlagen verfügen, die im Rahmen der Kartierung nicht komplett aufgenommen werden konnten. Die mittlere Verteilung beträgt 0,3 WGA/km<sup>2</sup> (Tab. 7-1).

Etwa 63% der recherchierten Wassergewinnungsanlagen werden nicht mehr genutzt. Der größte Teil hiervon sind Quelfassungen, die durch Bohrbrunnen ersetzt wurden. Von den restlichen 37% werden ca. 10% für eine sporadische Trinkwassernutzung in Notfällen oder für Brauchwasserzwecke in Landwirtschaft und Fischzucht betrieben. Lediglich rd. 33% der Wassergewinnungsanlagen dienten von 1995 bis 1997 der dauerhaften Gewinnung von Trinkwasser. Die wasserrechtlich zugelassene Entnahmerate für das Arbeitsgebiet beträgt rd. 122 Mio. m<sup>3</sup>/a. Gefördert wurden in den Jahren 1995 und 1996 rd. 77 Mio. m<sup>3</sup>/a. 1997 waren es rd. 76 Mio. m<sup>3</sup>/a, so dass rd. 63% der wasserrechtlich zugelassenen Grundwassermenge gefördert wurden.

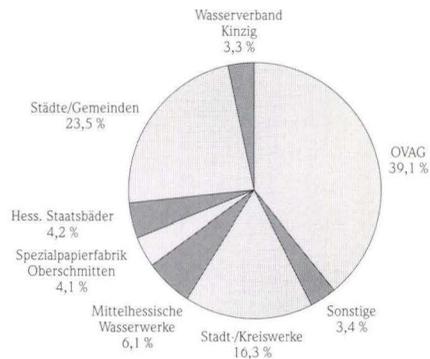
669 (68%) Wassergewinnungsanlagen liegen innerhalb der Grenzen des vulkanischen Vogelsberges. Hiervon werden 249 (37%) Wassergewinnungsanlagen genutzt. Bei einer wasserrechtlich zugelassenen Förderrate von rd. 75 Mio. m<sup>3</sup>/a wurden 1995 rd. 57 Mio. m<sup>3</sup>/a, 1996 rd. 58 Mio. m<sup>3</sup>/a und 1997 rd. 57 Mio. m<sup>3</sup>/a gefördert.

321 (32%) Wassergewinnungsanlagen befinden sich außerhalb der Basaltverbreitungsgrenze. 38%

(119 WGA) sind in diesem Bereich des Arbeitsgebietes in Betrieb. Die jährlichen Fördermengen lagen zwischen 1995 und 1997 bei 19–20 Mio. m<sup>3</sup>/a. Die wasserrechtlich zugelassene Förderrate beträgt rd. 47 Mio. m<sup>3</sup>/a.

Aus dem Vogelsberg entnehmen zahlreiche Kommunen direkt oder indirekt über Stadtwerke, Kreiswerke, Wasserversorgungsgruppen, Verbände und kommunal gegründete Gesellschaften Grundwasser zur Trinkwassernutzung (Tab. 7-2). Zwischen 1995 und 1997 wurden von den Kommunen rd. 69 Mio. m<sup>3</sup>/a gefördert. Die für diesen Zeitraum wasserrechtlich zugelassene maximale Entnahmerate lag bei rd. 110 Mio. m<sup>3</sup>/a. Die beiden hessischen Staatsbäder Bad Nauheim und Bad Salzhausen förderten in den drei Jahren zwischen 3,0–3,4 Mio. m<sup>3</sup>/a. Die privatwirtschaftlich betriebenen Wassergewinnungsanlagen kommen auf 4,0–4,5 Mio. m<sup>3</sup>/a.

Der größte Grundwasserentnehmer aus dem Vogelsberg ist mit rd. 30 Mio. m<sup>3</sup>/a (39%) die Oberhessische Versorgungsbetriebe AG (OVAG) (Abb. 7-1). Die Grundwasserentnahmen der OVAG finden



**Abb. 7-1.** Verteilung der Fördermengen für das Jahr 1995, gegliedert nach Betreibern.

durch die Wasserwerke Inheiden, Rainrod, Kohden, Orbes und Gedern/Merkenfritz statt (Abb. 7-2, 7-3). Das mit Abstand größte Wasserwerk im Vogelsberg ist Inheiden mit einer Förderrate von rd. 18 Mio. m<sup>3</sup>/a. In Inheiden werden 60% des Grundwassers der OVAG und 32% der Gesamtentnahmen aus dem vulkanischen Vogelsberg gefördert. Der größte gewerbliche Eigennutzer von Grundwasser ist die Spezialpapierfabrik Oberschmitten im mittleren Niddatal, die zwischen 1995 und 1997 rd. 3 Mio. m<sup>3</sup>/a (4%) Grundwasser entnahm. Hiervon wird jedoch ein Teil an die OVAG verkauft.

Die Wasserwerke mit überregionaler Bedeutung förderten 1995 zusammen 42,4 Mio. m<sup>3</sup>/a und hatten damit einen Anteil von 65% an der Gesamtentnahme. Das Wasserwerk Wirtheim der Mainova AG dient der Spitzen- bzw. Notversorgung und hat eine im Vergleich zum Wasserrecht entsprechend geringe Fördermenge. Ohne die Berücksichtigung der Wasserwerke Fischborn und Wirtheim zeigt ein Vergleich der Fördermengen, dass von 1990 bis 1995 die Fördermengen von 50,6 Mio. m<sup>3</sup>/a auf 40,0 Mio. m<sup>3</sup>/a und damit um 21% zurückgegangen sind. Bei der Summe

Tab. 7-1. Verteilung genutzter und ungenutzter Wassergewinnungsanlagen.

TK 25 - Nr.	TK 25 - Name	Arbeitsgebiets- fläche [km <sup>2</sup> ]	Anzahl der Wasser- gewinnungsanlagen	mittlere Verteilung (nur bei vollständig bearbeiteten Blättern)
5121	Schrecksbach	4,9	-	
5218	Niederwalgern	32,5	1	
5219	Amöneburg	130,6	29	0,22
5220	Kirtorf	130,7	27	0,21
5221	Alsfeld	130,8	24	0,18
5222	Grebenau	25,3	6	
5318	Allendorf (L.)	88,6	37	
5319	Londorf	131,1	22	0,17
5320	Burg-Gemünden	131,1	27	0,21
5321	Storndorf	131,1	30	0,23
5322	Lauterbach (H.)	131,1	39	0,30
5418	Gießen	116,7	41	
5419	Laubach	131,4	44	0,33
5420	Schotten	131,4	61	0,46
5421	Ulrichstein	131,4	51	0,39
5422	Herbstein	131,4	28	0,21
5423	Großenlüder	10,5	4	
5518	Butzbach	93,7	25	
5519	Hungen	131,6	33	0,25
5520	Nidda	131,6	45	0,34
5521	Gedern	131,6	56	0,43
5522	Freiensteinau	131,6	49	0,37
5523	Neuhof	20,3	5	
5618	Friedberg (H.)	31,9	5	
5619	Staden	131,8	24	0,18
5620	Ortenberg	131,9	22	0,17
5621	Wenings	131,9	57	0,43
5622	Steinau a.d.Str.	131,9	46	0,35
5623	Schlüchtern	17,2	5	
5720	Büdingen	132,1	47	0,36
5721	Gelnhausen	132,2	56	0,42
5722	Salmünster	132,2	34	0,26
	<b>Gesamt:</b>	<b>3 334,2</b>	<b>980</b>	<b>0,29</b>

**Tab. 7-2.** Fördermengen genutzter Wassergewinnungsanlagen, gegliedert nach Betreibern.

Betreiber	bewilligt		gefördert			1996			1997		
	[m³/a]	%	1995 [m³/a]	Anteil [%] an Gesamt- fördermenge	Anteil [%] an Gesamt- bewilligung	[m³/a]	Anteil [%] an Gesamt- fördermenge	Anteil [%] an Gesamt- bewilligung	[m³/a]	Anteil [%] an Gesamt- fördermenge	Anteil [%] an Gesamt- bewilligung
Gem. Antrifttal	106 000	0,087	66 472	0,09	62,71	65 332	0,09	61,63	67 393	0,09	63,6
Gem. Biebergemünd	175 200	0,144	101 975	0,13	58,20	107 700	0,14	61,47	101 540	0,13	58,0
Gem. Bad Salzschlirf	279 360	0,230	357 792	0,47	128,08	317 987	0,42	113,83	264 166	0,35	94,6
Gem. Birstein	652 375	0,536	432 623	0,56	66,32	432 026	0,56	66,22	403 939	0,53	61,9
Gem. Brachtal	367 155	0,302	241 349	0,31	65,73	233 726	0,31	63,66	227 692	0,30	62,0
Gem. Buseck	759 060	0,624	437 087	0,57	57,58	411 972	0,54	54,27	402 251	0,53	53,0
Gem. Ebsdorfergrund	254 536	0,209	26 765	0,03	10,52	289 131	0,38	113,59	264 664	0,35	104,0
Gem. Feldatal	265 000	0,218	184 640	0,24	69,68	176 860	0,23	66,74	155 056	0,20	58,5
Gem. Fernwald	384 850	0,316	326 082	0,42	84,73	351 029	0,46	91,21	362 221	0,48	94,1
Gem. Flieden			253 994	0,33		223 036	0,29		215 917	0,28	
Gem. Florstadt	117 535	0,097	31 438	0,04	26,75	39 709	0,05	33,78	39 518	0,05	33,6
Gem. Freiensteinau	355 425	0,292	262 219	0,34	73,78	241 033	0,31	67,82	249 259	0,33	70,1
Gem. Gemünden/Felda	236 000	0,194	176 285	0,23	74,70	182 355	0,24	77,27	176 602	0,23	74,8
Gem. Glauburg	189 000	0,155	166 208	0,22	87,94	155 676	0,20	82,37	154 986	0,20	82,0
Gem. Grebenhain	403 343	0,331	382 744	0,50	94,89	392 956	0,51	97,42	351 978	0,46	87,3
Gem. Großenlüder	60 000	0,049	102 489	0,13	170,82	104 065	0,14	173,44	105 026	0,14	175,0
Gem. Gründau	1 124 000	0,924	726 678	0,95	64,65	699 363	0,91	62,22	686 497	0,90	61,1
Gem. Hammersbach	200 000	0,164	163 333	0,21	81,67	177 650	0,23	88,83	182 576	0,24	91,3
Gem. Hirzenhain	25 000	0,021	22 690	0,03	90,76	14 037	0,02	56,15	20 158	0,03	80,6
Gem. Hosenfeld	455 000	0,374	304 599	0,40	66,94	295 172	0,39	64,87	299 446	0,39	65,8
Gem. Kefenrod	275 450	0,226	196 054	0,26	71,18	201 929	0,26	73,31	197 851	0,26	71,8
Gem. Lautertal	237 000	0,195	178 713	0,23	75,41	168 908	0,22	71,27	174 272	0,23	73,5
Gem. Limeshain	215 550	0,177	161 128	0,21	74,75	106 157	0,14	49,25	107 619	0,14	49,9
Gem. Mücke	578 000	0,475	920 229	1,20	159,21	805 512	1,05	139,36	800 615	1,05	138,5
Gem. Neuhof	12 775	0,010	4 441	0,01	34,76	4 245	0,01	33,23	3 759	0,00	29,4
Gem. Rabenau	332 000	0,273	239 552	0,31	72,15	242 346	0,32	73,00	237 924	0,31	71,7
Gem. Ranstadt	785 000	0,645	122 784	0,16	15,64	96 330	0,13	12,27	129 227	0,17	16,5
Gem. Reiskirchen	1 515 000	1,245	1 073 900	1,40	70,88	1 015 000	1,33	67,00	972 000	1,28	64,2
Gem. Rockenberg	2 400	0,002	1 200	0,00	50,00	1 200	0,00	50,00	1 200	0,00	50,0
Gem. Ronneburg	314 420	0,258	204 311	0,27	64,98	211 219	0,28	67,18	205 753	0,27	65,4
Gem. Schwalmtal	312 800	0,257	213 241	0,28	68,17	221 585	0,29	70,84	217 607	0,29	69,6
Gem. Wartenberg	295 000	0,242	234 056	0,30	79,34	246 724	0,32	83,64	224 677	0,30	76,2

Fortsetzung Tab. 7-2. Fördermengen genutzter Wassergewinnungsanlagen, gegliedert nach Betreibern.

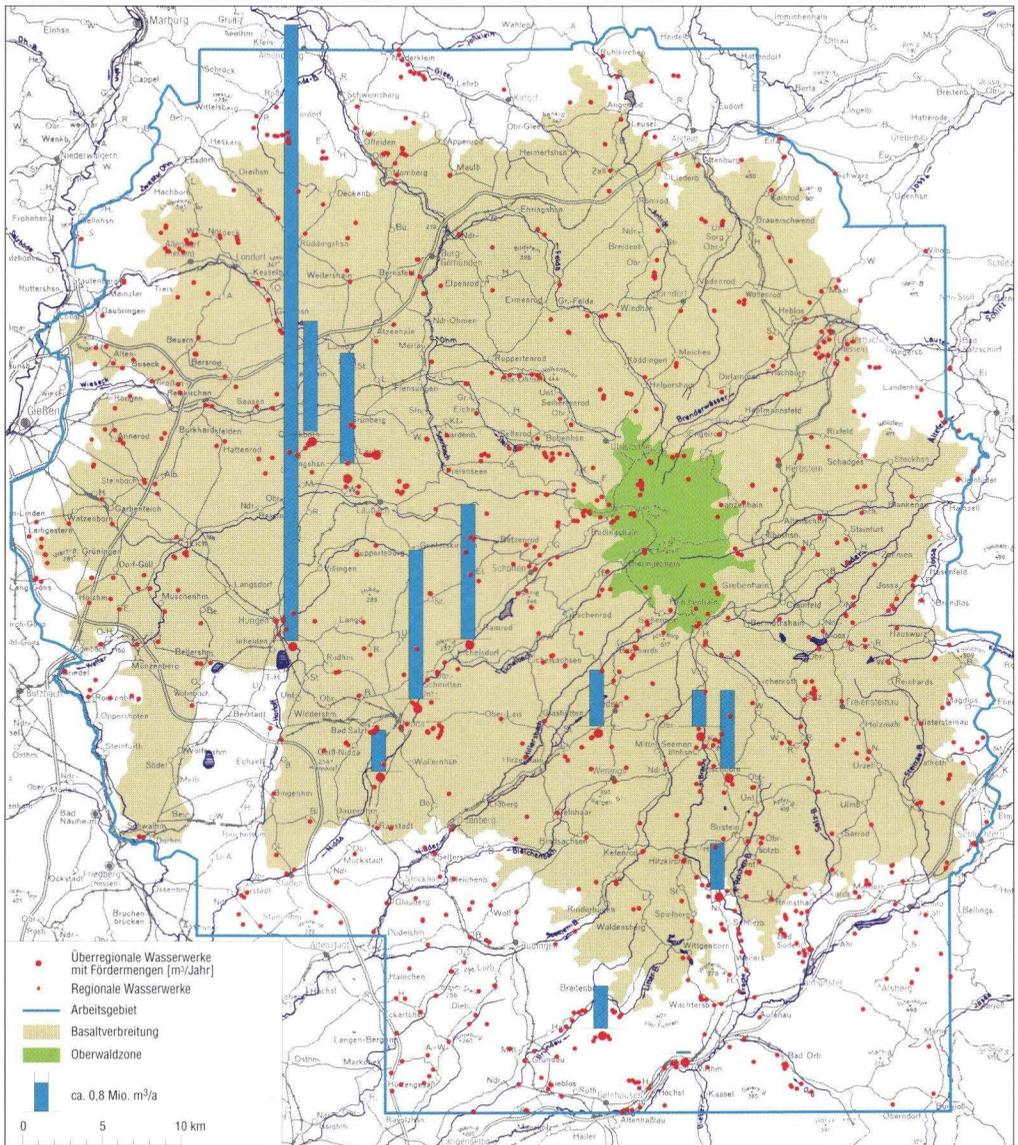
Betreiber	bewilligt		gefördert			1996			1997		
	[m³/a]	%	1995 [m³/a]	Anteil [%] an Gesamt- fördermenge	Anteil [%] an Gesamt- bewilligung	[m³/a]	Anteil [%] an Gesamt- fördermenge	Anteil [%] an Gesamt- bewilligung	[m³/a]	Anteil [%] an Gesamt- fördermenge	Anteil [%] an Gesamt- bewilligung
Stadt Allendorf/Lumda	218 000	0,179		0,00	0,00		0,00	0,00	203 928	0,27	93,5
Stadt Amöneburg	487 000	0,400	190 310	0,25	39,08	208 294	0,27	42,77	247 364	0,33	50,8
Stadt Bad Orb	734 500	0,604	375 612	0,49	51,14	335 673	0,44	45,70	298 797	0,39	40,7
Stadt Bad Soden- Salmünster	1 686 830	1,377	1 194 847	1,55	70,83	1 028 950	1,34	61,00	981 129	1,29	58,2
Stadt Gedern	780 000	0,641	558 141	0,73	71,56	486 986	0,64	62,43	458 054	0,60	58,7
Stadt Grebenau	65 700	0,054	41 606	0,05	63,33	38 264	0,05	58,24	38 730	0,05	58,9
Stadt Grünberg	763 000	0,627	648 615	0,85	85,01	622 979	0,81	81,65	568 176	0,75	74,5
Stadt Herbstein	519 158	0,427	254 045	0,33	48,93	347 499	0,45	66,94	330 400	0,44	63,6
Stadt Homberg/Ohm	759 150	0,624	665 807	0,87	87,70	644 990	0,84	84,96	653 693	0,86	86,1
Stadt Hungen	919 600	0,756	438 000	0,57	47,63	462 512	0,60	50,29	425 721	0,56	46,3
Stadt Kirtorf	208 500	0,171	181 000	0,24	86,81	189 000	0,25	90,65	190 000	0,25	91,1
Stadt Laubach	725 700	0,596	551 900	0,72	76,05	551 175	0,72	75,95	539 454	0,71	74,3
Stadt Lauterbach	1 927 000	1,583	1 181 188	1,54	61,30	1 215 365	1,59	63,07	1 164 528	1,53	60,4
Stadt Lich	345 000	0,283	335 057	0,44	97,12	330 454	0,43	95,78	306 546	0,40	88,9
Stadt Münzenberg	470 000	0,386	280 491	0,37	59,68	268 902	0,35	57,21	287 568	0,38	61,2
Stadt Nidda	741 270	0,609	503 338	0,66	67,90	476 642	0,62	64,30	463 717	0,61	62,6
Stadt Ortenberg	158 840	0,131	123 496	0,16	77,75	90 895	0,12	57,22	88 043	0,12	55,4
Stadt Romrod	111 000	0,091	95 508	0,12	86,04	88 698	0,12	79,91	99 684	0,13	89,8
Stadt Schlitz	17 000	0,014	33 780	0,04	198,71	30 260	0,04	178,00	36 780	0,05	216,4
Stadt Schlüchtern	200 605	0,165	168 347	0,22	83,92	153 134	0,20	76,34	141 463	0,19	70,5
Stadt Schotten	1 230 300	1,011	657 264	0,86	53,42	773 172	1,01	62,84	673 687	0,89	54,8
Stadt Stadtallendorf	95 000	0,078	30 051	0,04	31,63	70 279	0,09	73,98		0,00	0,0
Stadt Steinau	1 539 600	1,265	776 987	1,01	50,47	702 869	0,92	45,65	651 727	0,86	42,3
Stadt Ulrichstein	474 196	0,390	303 143	0,39	63,93	213 056	0,28	44,93	302 140	0,40	63,7
Stadt Wächtersbach	2 112 798	1,736	742 947	0,97	35,16	665 017	0,87	31,48	709 141	0,93	33,6
Stadtwerke Alsfeld	1 725 000	1,417	1 300 138	1,69	75,37	1 269 185	1,66	73,58	1 288 457	1,70	74,7
Stadtwerke Büdingen	2 062 760	1,695	1 449 705	1,89	70,28	1 369 393	1,79	66,39	1 366 067	1,80	66,2
Stadtwerke Frankfurt	2 660 000	2,186	2 908 915	3,79	109,36	3 200 300	4,18	120,31	3 266 675	4,30	122,8
Stadtwerke Gelnhausen	4 402 000	3,617	2 600 794	3,39	59,08	2 367 037	3,09	53,77	2 531 925	3,34	57,5
Stadtwerke Gießen	5 700 000	4,684	3 310 156	4,31	58,07	3 207 295	4,19	56,27	3 531 989	4,65	62,0

Kreiswerke Hanau	1 045 000	0,859	501 770	0,65	48,02	975 572	1,27	93,36	937 084	1,23	89,7
Kreiskrankenhaus	52 560	0,043	26 000	0,03	49,47	18 618	0,02	35,42	20 109	0,03	38,3
Schotten											
Schullandheim Wegscheidung	80 000	0,066	62 276	0,08	77,85		0,00	0,00	62 656	0,08	78,3
OVAG	42 386 128	34,828	29 735 481	38,74	70,15	29 863 236	38,99	70,46	30 078 857	39,63	71,0
Wasservers. Dieberggruppe	310 000	0,255	285 935	0,37	92,24	283 284	0,37	91,38	270 966	0,36	87,4
Wasserverband Kinzig	6 570 000	5,398	2 470 620	3,22	37,60	2 534 980	3,31	38,58	2 544 640	3,35	38,7
ZVB "Glückauf" Lollar	1 400 975	1,151	1 195 345	1,56	85,32	1 134 255	1,48	80,96	1 062 800	1,40	75,9
ZVB Mittelhess.	13 500 000	11,093	4 704 264	6,13	34,85	4 820 638	6,29	35,71	4 370 339	5,76	32,4
Wasserwerke											
Hess. Staatsbad Bad Nauheim	4 963 900	4,079	3 349 343	4,36	67,47	3 309 467	4,32	66,67	2 978 733	3,92	60,0
Hess. Staatsbad Bad Salzh.	124 000	0,102	25 521	0,03	20,58	31 897	0,04	25,72	29 084	0,04	23,5
Kurverwaltung Bad Orb	332 390	0,273	47 666	0,06	14,34	46 708	0,06	14,05	43 997	0,06	13,2
Bischöflicher Stuhl	60 444	0,050	60 000	0,08	99,27	60 000	0,08	99,27	60 000	0,08	99,3
Brauerei Lich	244 872	0,201	151 578	0,20	61,90	121 268	0,16	49,52	142 013	0,19	58,0
Brauerei Wächtersbach	232 000	0,191	36 501	0,05	15,73	35 874	0,05	15,46	31 668	0,04	13,7
Burgbrauerei Lauterbach			59 077	0,08		57 876	0,08		52 175	0,07	
Dreiturm Chemie GmbH	200 000	0,164	41 470	0,05	20,74	40 967	0,05	20,48	45 345	0,06	22,7
Golfclub Spessart	3 600	0,003	1 544	0,00	42,89	1 205	0,00	33,47	1 690	0,00	46,9
Immergut Molkerei	220 000	0,181									
Molkerei Hungen	300 000	0,247	291 708	0,38	97,24	264 229	0,35	88,08	265 346	0,35	88,4
Riedesel			17 693	0,02		21 905	0,03		19 692	0,03	
Spezialpapierfabrik Obersch.	4 175 000	3,431	3 270 522	4,26	78,34	3 151 798	4,12	75,49	2 903 622	3,83	69,5
Fa. Jackl, Hungen	300 000	0,247	262 254	0,34	87,42	261 963	0,34	87,32	263 740	0,35	87,9
Fischzucht Janzen	130 000	0,107	40 000	0,05	30,77	40 000	0,05	30,77	40 000	0,05	30,8
Papierfabrik Maria Soell	750 000	0,616	169 236	0,22	22,56	152 898	0,20	20,39	104 185	0,14	13,9
Tierkörperverwertungsanstalt Hopfgarten			19 237	0,03		16 901	0,02		23 354	0,03	
Versuchsgut Uni Gießen			48 136	0,06		10 845	0,01		4 127	0,01	
<b>Gesamt:</b>	<b>122 504 610</b>	<b>100,00</b>	<b>77 091 436</b>	<b>100,00</b>	<b>62,93</b>	<b>76 896 629</b>	<b>100,00</b>	<b>62,77</b>	<b>76 205 194</b>	<b>100,00</b>	<b>62,2</b>

der wasserrechtlichen Genehmigungen bzw. Erlaubnisse ist ebenfalls ein Rückgang um 7% von 65,1 Mio. m<sup>3</sup>/a auf 60,5 Mio. m<sup>3</sup>/a zu verzeichnen.

Im Vogelsberg befinden sich weitere acht z.T. fast komplett fertig gestellte Wasserwerke (Brei-

tenborn, Groß-Eichen, Groß-Felda, Illnhäusen, Mauswinkel, Merlau, Ober-Ohmen, Salz). Diese Wasserwerke sind aus ökologischen Gesichtspunkten nicht mehr ans Netz gegangen, da schwerwiegende Eingriffe in die Natur befürchtet wurden. Die prognostizierte Entnahmerate für



**Abb. 7-2.** Wassergewinnungsanlagen, überregionale Wasserwerke mit Fördermengen [m<sup>3</sup>/a] für das Jahr 1995.

diese Wassergewinnungsgebiete liegt bei nochmals knapp 41 Mio. m<sup>3</sup>/a. Ihre Brunnen werden

heute z.T. lediglich als Grundwassermessstellen genutzt.

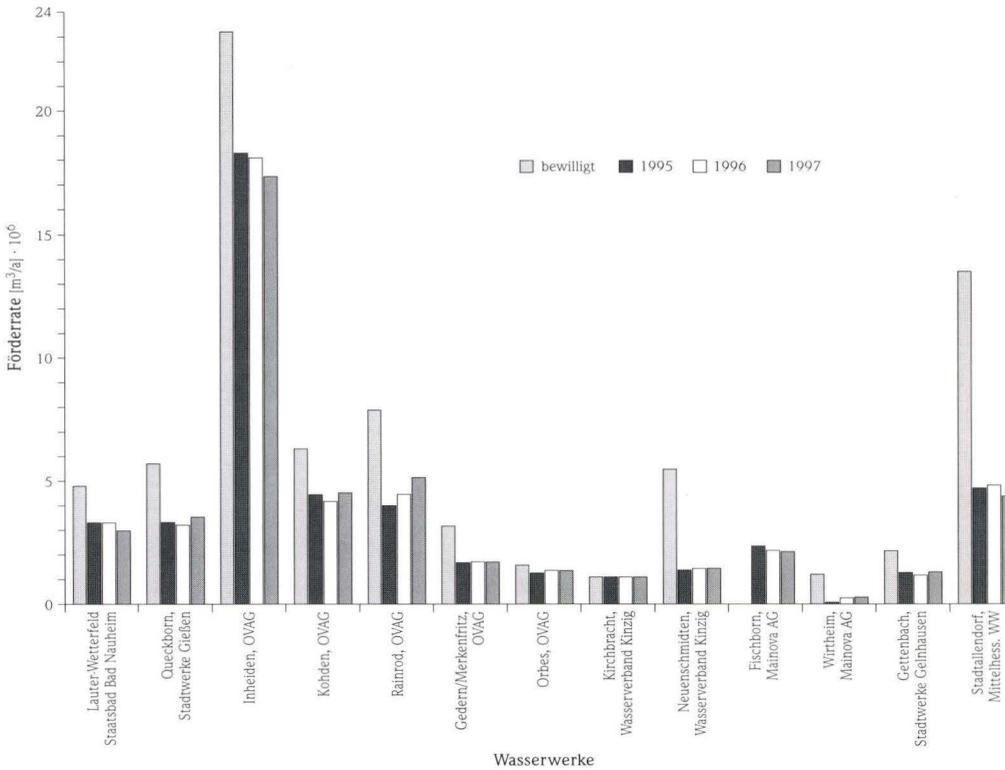


Abb. 7-3. Bewilligte und geförderte Wassermengen [m<sup>3</sup>/a] für 1995, 1996 und 1997 von überregionalen Wasserwerken.

## 7.2 Grundwasserschutz

Das Grundwasser im Arbeitsgebiet ist durch zahlreiche festgesetzte oder in Verfahren befindliche Trinkwasserschutzgebiete und Heilquellenschutzgebiete geschützt (CD Anl. 3). Diese Fläche beträgt rd. 1750 km<sup>2</sup> und entspricht damit 53% des rd. 3300 km<sup>2</sup> großen Arbeitsgebietes.

Die Heilquellenschutzgebiete nehmen hierbei eine Fläche von rd. 370 km<sup>2</sup> (rd. 11% des Arbeitsgebietes) ein. Sie gliedern sich in die Heilquellenschutzzone I (rd. 0,04 km<sup>2</sup>), die Heilquellenschutzzone II (rd. 4 km<sup>2</sup>), die Heilquellenschutzzone III (rd. 47 km<sup>2</sup>) und die Heilquellenschutzzone IV (rd. 319 km<sup>2</sup>). Die Heilquellenschutzgebiete über-

schnitten sich zum Teil mit den Trinkwasserschutzgebieten. Die Fläche der Trinkwasserschutzgebiete beträgt rd. 1470 km<sup>2</sup> (rd. 45% des Arbeitsgebietes). Hiervon liegen rd. 0,8 km<sup>2</sup> in der Trinkwasserschutzzone I, rd. 65 km<sup>2</sup> in der Trinkwasserschutzzone II, rd. 489 km<sup>2</sup> in der Trinkwasserschutzzone III, rd. 237 km<sup>2</sup> in der Trinkwasserschutzzone IIIa und rd. 679 km<sup>2</sup> in der Trinkwasserschutzzone IIIb.

Wasserschutzgebiete sollen flächendeckend verhindern, dass es zu Verunreinigungen und sonstigen Beeinträchtigungen des Grundwassers im Interesse der Gesundheit der Bevölkerung und der Na-

tur kommt (DVGW 1995). Trinkwasserschutzgebiete werden in drei Zonen gegliedert. Die Weitere Schutzzone (Zone III) soll gewährleisten, dass das durch eine Trinkwassergewinnungsanlage geförderte Grundwasser nicht durch schwer oder nicht abbaubare chemische oder radioaktive Stoffe verunreinigt wird. Die Zone III umfasst in der Regel das gesamte unterirdische Einzugsgebiet der Trinkwassergewinnungsanlage. Das oberirdische Einzugsgebiet ist möglichst dann mit einzubeziehen, wenn der Brunnen einen Teil seiner Förderung aus Uferfiltrat und Seihwasser deckt, bei dem von einer Verweildauer unter 50 Tagen im Grundwasserleiter ausgegangen werden kann (DVGW 1995). In Abhängigkeit von der Abstandsgeschwindigkeit und/oder der Grundwasserüberdeckung kann in begründeten Fällen eine Unterteilung der Weiteren Schutzzone in die Teilzonen IIIA und IIIB erfolgen. Die hohen Abstandsgeschwindigkeiten, die vor allem bei den überregionalen Großwasserwerken vorkommen (z.B. Wasserwerk Inheiden), machen es erforderlich, dass die Grenze zwischen den Zonen IIIA und IIIB bei diesen Wasserwerken über die in W 101 vorgeschlagenen 2 km hinausgeht.

Die Engere Schutzzone (Zone II) einer Trinkwassergewinnungsanlage dient dazu, Verunreinigungen durch pathogene Mikroorganismen wie Bakterien, Viren, Parasiten und Wurmeier sowie sonstige Beeinträchtigungen zu verhindern. Um dieses zu gewährleisten, wurde eine Mindestverweildauer des Grundwassers in den Grundwasserleitern von 50 Tagen festgesetzt. Über den Hintergrund und den Sinn der 50-Tage-Linie informieren zahlreiche Veröffentlichungen (Knorr 1951, DVGW 1983, Althaus 1983, Riemer 1983, Mattheß et al. 1985, Hölting 1996). Der Fassungsbereich (Zone I) ist in direkter Umgebung der Wassergewinnungsanlage und soll so unmittelbar vor Verunreinigungen und Beeinträchtigungen schützen.

Für die Flächen innerhalb der verschiedenen Schutzzonen bestehen Verbote, Auflagen und Nutzungsbeschränkungen, die zu teilweise erheblichen Interessenskonflikten führen können. So sollten Gebäude, Straßen und Bahnlinien nicht in der Zone II liegen. In der Weiteren Schutzzone stellen u.a. jegliche Art von Abfallbehandlungsanlagen und -deponien sowie Gebiete für Industrie

und produzierendes Gewerbe Gefährdungen für das Grundwasser dar (DVGW 1995) und sind nur in Ausnahmefällen zulässig.

Bei der Ausweisung eines Wasserschutzgebietes kommt der Beurteilung von Art und Ausbildung des Grundwasserleiters eine entscheidende Bedeutung zu. Da Kluftgrundwasserleiter in der Bewertung ihrer geohydraulischen Parameter zwischen den Poren- und den Karstgrundwasserleitern stehen, werden sie in dem Arbeitsblatt W 101 des DVGW entweder dem einen oder dem anderen zugeordnet. Spezielle Richtlinien, die nur für die Ausweisung von Schutzgebieten in Kluftgrundwasserleitern gelten, bestehen nicht.

Für eine sinnvolle Festlegung von Schutzgebietsgrenzen in Kluftgrundwasserleitern sind Informationen zur Grundwasserstockwerksgliederung, Hydraulik zwischen den Grundwasserstockwerken und zu den geohydraulischen Parametern der einzelnen Grundwasserleiter notwendig (Kap. 6). Falls wesentliche Informationen zur Grundwasserstockwerksgliederung und zu den Grundwasserstockwerken fehlen, muss bei der Ausweisung von Wasserschutzgebieten im Vogelsberg teilweise vorsorglich ein vergleichsweise großes Gebiet festgesetzt werden.

Liegen keine Informationen zum Grundwasserstockwerksbau vor, muss davon ausgegangen werden, dass oberflächennahes Wasser gefördert wird. Bei den teilweise großen Fördermengen der Wassergewinnungsanlagen ist die Ausweisung von entsprechend großflächigen Engeren Schutzzonen notwendig, die zu erheblichen Nutzungsbeschränkungen führen.

Brunnen, bei denen bekannt ist, dass sie Grundwasser aus einem oder mehreren tieferen Grundwasserstockwerken der Zone der Durchgehenden Grundwassersättigung fördern und die zu den oberen Stockwerken abgedichtet sind, brauchen zum Schutz des Grundwassers nach W 101 keine Engere Schutzzone, da durch die natürlichen Gegebenheiten kein Grundwasser gefördert werden kann, das weniger als 50 Tage in den Grundwasserstockwerken verweilt.

Die Darstellung der Abflusspenden und Abflussabgaben (Abb. 8-1) zeigt, dass bei Wassergewinnungsanlagen in Auenbereichen mit einer Förde-

rung von Uferinfiltrat und Seihwasser, dessen mittlere Verweildauer im Untergrund weniger als 50 Tage beträgt, gerechnet werden muss. In solchen Fällen ist besonders auf die Reinhaltung des infiltrierenden oberirdischen Gewässers und seines Einzugsgebietes zu achten (DVGW 1995).

Probleme für die Grundwasserqualität können sich u.a. bei Stauanlagen oder Seen (z.B. Nidda-talsperre) ergeben, wenn sie zur Grundwasseranreicherung beitragen und trotzdem als Badeseen genutzt werden. Kritisch zu sehen sind ebenfalls Abwasserleitungen, die im Untersuchungsgebiet gelegenen Kläranlagen und die Überlaufrohre für Abwasser, die direkt in die Vorfluter münden. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn die Kläranlagen oder Überlaufrohre oberhalb einer Wassergewinnungsanlage liegen, die zum Teil Infiltrat fördert. Für die Grundwasserqualität im Vogelsberg sind Abwasserverbände mit Kläranlagen, die außer-

halb der Einzugsgebiete liegen, von Vorteil. Dem steht allerdings das Risiko von Leckagen in langen, die Einzugsgebiete von Wassergewinnungsanlagen querenden Abwasserleitungen gegenüber.

Im Untersuchungsgebiet befinden sich ferner Ablagerungen, Deponien, Altablagerungen und Altdeponien, die je nach Nutzungsart als mehr oder weniger grundwassergefährdend eingestuft werden können. Als kritisch sind hierbei insbesondere noch betriebene Deponien zu bewerten, die sich in den Einzugsgebieten von Wasserwerken befinden.

Die große Bedeutung des Vogelsberges für die Trinkwassergewinnung sollte über die Auflagen der Wasserschutzgebiete hinaus berücksichtigt werden. Dieses gilt insbesondere für langfristige Planungen (z.B. Regionalplanungen, Flächennutzungspläne). Nur so kann eine nachhaltige, also auch für zukünftige Generationen gesicherte Wasserversorgung gewährleistet werden.

## 8. Wasserhaushalt

### 8.1 Abflussspenden und Abflussabgaben

Der Begriff **Abflussspende** ( $q > 0$ ) wird nach der Definition der DIN 4049-3 (1994) verwendet. Die Abflussspende ist danach der Quotient aus dem Abfluss und der Fläche des zugeordneten Einzugsgebietes.

Neu eingeführt und definiert werden folgende Begriffe:

**Abflussabgabe** ( $q < 0$ , „negative Abflussspende“): Die Abflussabgabe ( $q$ ) ist der Quotient aus dem Abflussverlust ( $\Delta Q < 0$ ) und der Fläche ( $A_E$ ) des zugeordneten Einzugsgebietes. Im Gegensatz zur Abflussspende, die einen Abflusszuwachs ( $\Delta Q > 0$ ) bzw. einen unveränderten Abfluss ( $\Delta Q = 0$ ) pro Einzugsgebiet wiedergibt, lässt die Abflussabgabe die Darstellung eines Abflussverlustes ( $\Delta Q < 0$ ) pro Einzugsgebiet zu.

$$q = \Delta Q / A_E \quad [l/(s \cdot km^2)].$$

**reeller Abfluss** ( $Q_{reell}$ ):

Der reelle Abfluss ( $Q_{reell}$ ) entspricht dem Abfluss-

nach DIN 4049-3 (1994). Er ist das Wasservolumen, das einen bestimmten Querschnitt in einer Zeiteinheit durchfließt und einem Einzugsgebiet zugeordnet ist.

**potenzieller Abfluss** ( $Q_{pot}$ ):

Der potenzielle Abfluss ( $Q_{pot}$ ) ist die Summe aus dem reellen Abfluss ( $Q_{reell}$ ) und der aus dem zugeordneten Einzugsgebiet entnommenen oder abgeleiteten Wassermenge ( $Q_G$ ):

$$Q_{pot} = Q_{reell} + Q_G \quad [l/s, m^3/s].$$

Hieraus folgt, dass reelle Abflussspenden und Abflussabgaben ( $q_{reell}$ ) sowie potenzielle Abflussspenden und Abflussabgaben ( $q_{pot}$ ) berechnet werden können.

$$q_{reell} = \Delta Q_{reell} / A_E \quad [l/(s \cdot km^2)],$$

$$q_{pot} = \Delta Q_{pot} / A_E \quad [l/(s \cdot km^2)].$$

Die in Abb. 8-1 dargestellten reellen Abflussspenden und Abflussabgaben ( $q_{reell}$ ) beruhen auf drei Abflussmesskampagnen, die in den Jahren

1994, 1995 und 1999 durchgeführt wurden (CD Anl. 4). Die Abflüsse lagen im NQ-Bereich.

Die Abflussspenden und Abflussabgaben ( $q_{\text{reil}}$ , Abb. 8-1) zeichnen die hydrogeologische Dreiteilung des Vogelsberges nach (Kap. 6.3). Während in der Oberwaldzone und besonders in der Zone der Durchgehenden Grundwassersättigung Abflussspenden ( $q_{\text{reil}}$ ) mit teilweise erheblichen Abfluss-

zuwächsen ( $\Delta Q > 0$ ) dominieren, überwiegen in der Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke Gebiete ohne Abflussänderung ( $\Delta Q = 0$ ) und solche mit Abflussverlusten ( $\Delta Q < 0$ ).

### Oberwaldzone

Die Oberwaldzone, deren Grundwasseraustritte sich durch ganzjährige Schüttungen auszeich-

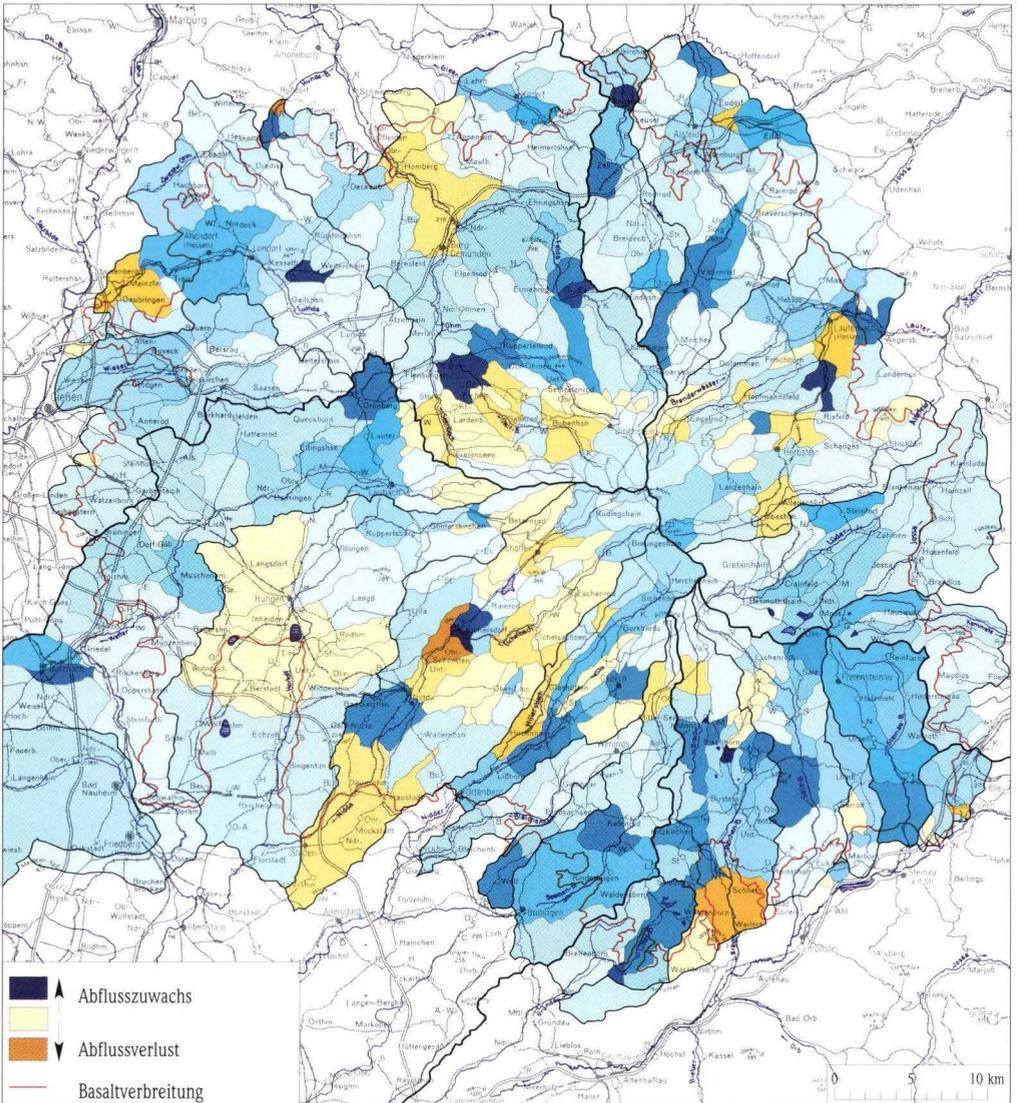


Abb. 8-1. Abflussspenden und Abflussabgaben ( $q_{\text{reil}}$ , 90er Jahre).

nen, weist die obersten schwebenden Grundwasserstockwerke des Vogelsberges auf (Kap. 6.3.1). Die höchste Abflussspende ( $q_{\text{reell}}$ ) (Abb. 8-1) wird hier im oberirdischen Teileinzugsgebiet 73, direkt östlich vom Taufstein, mit  $6,3 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$  und einem Abflusszuwachs ( $\Delta Q$ ) von  $21,1 \text{ l/s}$  erreicht.

Bei den in Hessen vorherrschenden zyklonalen Westwindwetterlagen fallen im Luv-Bereich, also an den Westhängen der Mittelgebirge, größere Niederschlagsmengen als im Lee-Bereich (Kap. 2.2). Trotz dieser Niederschlagsverteilung sind die oberirdischen Abflüsse aus den westlichen oberirdischen Teileinzugsgebieten der Oberwaldzone gleich hoch wie die aus den östlichen Teileinzugsgebieten. Die Teileinzugsgebiete 70 ( $\Delta Q$ :  $4,5 \text{ l/s}$ ), 71 ( $6,5 \text{ l/s}$ ), 73 ( $21,1 \text{ l/s}$ ), 74 ( $4,8 \text{ l/s}$ ), 75 ( $6,5 \text{ l/s}$ ), 76 ( $5,7 \text{ l/s}$ ), 78 ( $34,1 \text{ l/s}$ ), 86 ( $10,2 \text{ l/s}$ ), 88 ( $5,3 \text{ l/s}$ ) und 92 ( $1,8 \text{ l/s}$ ) in der östlichen Hälfte der Oberwaldzone hatten einen Gesamtabfluss von  $100,5 \text{ l/s}$ . Die westlichen Teileinzugsgebiete 1 ( $\Delta Q$ :  $6,6 \text{ l/s}$ ), 12 ( $4,5 \text{ l/s}$ ), 21 ( $23,9 \text{ l/s}$ ), 35 ( $17,5 \text{ l/s}$ ), 40 ( $32,2 \text{ l/s}$ ), 95 ( $0,4 \text{ l/s}$ ), 105 ( $9,4 \text{ l/s}$ ) und 109 ( $7,2 \text{ l/s}$ ) lagen mit zusammen  $101,7 \text{ l/s}$  nur geringfügig darüber.

### **Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke**

Auf der Karte der Abflussspenden und Abflussabgaben ( $q_{\text{reell}}$ ) (Abb. 8-1) wird die Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke von gelben ( $q_{\text{reell}} = 0$ ) und orangen Farbtönen ( $q_{\text{reell}} < 0$ ) dominiert. Flüsse, die in der Oberwaldzone entspringen, verlieren in der Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke teilweise erhebliche Mengen Wasser. Das Abflussprofil Hundsbach/Horstbach/Bracht (Kap. 6.5.1) zeigt das räumliche Abflussverhalten von Vorflutern, die durch die Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke fließen. Bereiche, in denen Wasser zutrifft, wechseln mit Bereichen, in denen Wasser schwindet. Die Vorfluter, deren Quellen in der Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke liegen, fallen regelmäßig während länger andauernder Phasen ohne Niederschläge trocken (Abb. 6-34).

Hohe Abflussspenden ( $q_{\text{reell}}$ ) von Teileinzugsgebieten, die in der Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke liegen, sind durch Talanschnitte von ergiebigen schwebenden Grundwasserstockwerken erklärbar. Im Bereich Gedern (Teileinzugs-

gebiet 46,  $\Delta Q$ :  $49,8 \text{ l/s}$ ) schneidet die Geländeoberfläche das Niveau mehrerer schwebender Grundwasserstockwerke (CD Anl. 4).

Die Niddatalsperre liegt in der Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke. Dies führt durch die unterlagernden klüftigen Basalte zu Versinkungen von Talsperrenwasser und damit zu einer Grundwasseranreicherung. Das Mittel liegt bei  $150 \text{ l/s}$ . Der Abfluss der unterhalb liegenden Teileinzugsgebiete wird durch das versinkende Talsperrenwasser beeinflusst. Trotz der Grundwasserentnahme durch die Brunnen des Wasserwerkes Rainrod (rd.  $4 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$ ,  $\varnothing 125 \text{ l/s}$ ) aus dem Teileinzugsgebiet 6 wurde im September 1994 ein Abflusszuwachs ( $\Delta Q$ ) von  $63,5 \text{ l/s}$  gemessen. Eine Quantifizierung des Einflusses von Grundwasser, das aus der Niddatalsperre stammt, auf den Abfluss der Nidda bzw. des Anteils an der Fördermenge im Wasserwerk Rainrod ist mit den vorliegenden Daten nicht möglich.

Oberhalb der Niddatalsperre liegt das Teileinzugsgebiet 3. Der Grund für die Wasserverluste ( $\Delta Q$ :  $-10,6 \text{ l/s}$ ) der Nidda in diesem Teileinzugsgebiet kann geologisch und/oder wasserwirtschaftlich bedingt sein. Gesteinspartien mit größeren Durchlässigkeiten oder tektonisch bedingte Störungen können die Ursache für das Schwinden von Wasser aus den Oberflächengewässern sein. Eine wasserwirtschaftliche Beeinflussung wird jedoch ebenfalls nicht ausgeschlossen. Der Stauseebrunnen der Stadt Schotten liegt im unteren Bereich des Teileinzugsgebietes. Er förderte 1995 rd.  $175\,000 \text{ m}^3/\text{a}$  ( $\varnothing 5,5 \text{ l/s}$ ) Grundwasser. Die trotz einer  $20 \text{ m}$  mächtigen Tonabdichtung geringe elektrische Leitfähigkeit des geförderten Wassers von etwa  $260 \mu\text{S}/\text{cm}$  (Messwerte vom 28.06.1993 und 11.07.1994), die zeitweise hohen Nitrat-Konzentrationen bis zu  $55,8 \text{ mg/l}$  (RUA vom 22.06.1992) und die zum Teil erhöhten Keimzahlen lassen darauf schließen, dass eine Verbindung des Brunnens zu oberflächennahen Grundwasserstockwerken vorhanden ist und dass so Infiltrat aus der Nidda in den Brunnen gelangt.

### **Zone der Durchgehenden Grundwassersättigung**

Von besonderem Interesse ist das Gebiet der Teileinzugsgebiete 6, 7, 10 und 28 im Niddatal

nordöstlich der Stadt Nidda. Die großen überregionalen Wasserwerke Kohden (Fördermenge 1995: 4,4 Mio. m<sup>3</sup>/a) und Rainrod (4,0 Mio. m<sup>3</sup>/a) sowie die Spezialpapierfabrik Ober-Schmitten (3,3 Mio. m<sup>3</sup>/a) befinden sich hier. Das Teileinzugsgebiet 7 wies trotz einer Gesamtentnahme von 11,7 Mio. m<sup>3</sup>/a ( $\varnothing$  371 l/s) aus den umliegenden Teileinzugsgebieten die höchste Abflussspende (124,5 l/(s·km<sup>2</sup>),  $\Delta Q$ : 168 l/s) des Arbeitsgebietes auf.

Im oberirdischen Teileinzugsgebiet 7 liegt die Mündung des Eichelbaches in die Nidda. Der Eichelbach führt über lange Perioden des Jahres mehr Wasser als die Nidda oberhalb dieser Einmündung. Während der Abflussmessungen im Oktober 1994 war dies ebenfalls der Fall ( $Q_{\text{reell}} = 23,7$  l/s, Teileinzugsgebiet 23). Der Zufluss der Nidda in die Niddatalsperre lag mit 22,2 l/s (Teileinzugsgebiet 3) knapp darunter. Der Abfluss der Nidda unterhalb der Niddatalsperre wird durch die Talsperre reguliert. Während der Abflussmessungen wurden konstant 75 l/s abgelassen, also mehr als das dreifache der zu diesem Zeitpunkt normalen Wasserführung. Unterhalb der Niddatalsperre kommt es im Teileinzugsgebiet 6 zu erheblichen Abflusszuwächsen ( $\Delta Q$ : 63,5 l/s). In dieser Situation mündet der Eichelbach in die Nidda. Die effluenten Abflussverhältnisse im Teileinzugsgebiet 7 werden wahrscheinlich durch den Grundwasserabstrom des quartären Eichelbach-Grundwasserleiters so verstärkt, dass ein im Vergleich zu den anderen Werten im Arbeitsgebiet deutlich herausragender Abflusszuwachs vorhanden ist.

Im Abstrom befindet sich das Teileinzugsgebiet 28 mit der höchsten Abflussabgabe [ $q_{\text{reell}} = -13,5$  l/(s·km<sup>2</sup>)] des Arbeitsgebietes. Der Abflussverlust betrug annähernd 80 l/s. Durch die Grundwasserabsenkung der Brunnen 3 und 6 der Spezialpapierfabrik Ober-Schmitten, die in unmittelbarer Nähe zum Vorfluter liegen, kommt es zur Infiltration von Niddawasser. Es ist anzunehmen, dass sich die Infiltrationsstrecken im Absenkbereich der beiden Brunnen befinden. Im direkt unterhalb liegenden oberirdischen Teileinzugsgebiet 10, in dem ein Abflussverlust von 10 l/s gemessen wurde, liegt das Wasserwerk Kohden. Die Grundwasserentnahme führt auch hier zu einem influenten Gefälle. Beim Zugrundelegen der im September 1994 durchge-

föhrten Abflussmessungen ( $\Delta Q$ : -90 l/s) ergibt sich eine Infiltrationsmenge von ca. 2,8 Mio. m<sup>3</sup>/a. Das bedeutet bei einer Grundwasserförderung von 7,7 Mio. m<sup>3</sup>/a (1995) einen Anteil von über 36% an der Gesamtförderung.

Die Rohwasseranalysen der Brunnen des Wasserwerkes Kohden und der Spezialpapierfabrik Ober-Schmitten zeigen, dass Flusswasser der Nidda als Filtrat gefördert wird. Die elektrische Leitfähigkeit ist hierfür beispielhaft. In den Brunnen des Wasserwerkes Kohden wird ein Mischwasser (300  $\mu\text{S/cm}$ ) aus Grundwasser (480  $\mu\text{S/cm}$ ) und Niddawasserinfiltrat (250  $\mu\text{S/cm}$ ) gefördert. Eben solches gilt für die Brunnen der Spezialpapierfabrik Ober-Schmitten (256  $\mu\text{S/cm}$ ).

Der mit Abstand größte Abflussverlust von 151 l/s wurde im oberirdischen Teileinzugsgebiet 247 gemessen. Das Gebiet befindet sich am südöstlichen Rand des Untersuchungsgebietes im Bereich zwischen Neuenschmidten und Hesseldorf. Abflussmessungen, die im September 1983 durchgeführt wurden, verzeichneten ebenfalls einen Abflussverlust von fast 100 l/s (Scharpff & Quadflieg 1988).

Während auf den Bergkuppen tertiäre Basalte liegen, bestehen die Talflanken des unteren Brachttales aus den Schichten des Buntsandsteins. Die petrologische Grenze bedingt zahlreiche Schichtquellen, die in den benachbarten Teileinzugsgebieten zu hohen Abflussspenden führen. Die Spanne der Abflussspenden ( $q_{\text{reell}}$ ) reicht vom oberirdischen Teileinzugsgebiet 240 mit 3,6 l/(s·km<sup>2</sup>) bis zum Teileinzugsgebiet 245 mit 11,8 l/(s·km<sup>2</sup>).

In den Teileinzugsgebieten 240, 243, 245 und 247 befinden sich die Brunnen des Wasserwerkes Neuenschmidten. Das Wasserwerk besteht aus einer Nordgruppe (Br. V, Br. VII, Br. VIII, Br. IX), die in den Teileinzugsgebieten 240, 243 und 245 liegt, und einer Südgruppe (Br. I, Br. II, Br. III). Die Brunnen der Südgruppe befinden sich im Teileinzugsgebiet 247, das eine Abflussabgabe ( $q_{\text{reell}}$ ) von -9,6 l/(s·km<sup>2</sup>) hat. Im Jahr 1995 förderten die Brunnen des Wasserwerkes rd. 1,4 Mio. m<sup>3</sup>/a Grundwasser; das entspricht einer mittleren Entnahmerate von 45 l/s. Allein der Größenvergleich zwischen der versickernden Wassermenge (100–150 l/s) und der Entnahmemenge macht deutlich, dass die Grund-

wasserförderung durch die Brunnen des Wasserwerkes Neuenschmidten nicht der entscheidende Faktor für die Wasserverluste aus der Bracht ist.

Der Hauptgrund für das Versickern von Flusswasser im Gebiet des unteren Brachttales ist in den natürlichen geologischen Gegebenheiten zu sehen. Die geologische Karte des Gebietes zeigt annähernd NNW–SSE verlaufende Störungen. Da auf den Feldern östlich von Schlierbach immer wieder kleinere Erdfälle (bis zu  $1 \text{ m}^3$ ) beobachtet

werden, müssen die Störungen über erhebliche Klaffweiten verfügen. Die Erdfälle haben eine Beeinträchtigung der Bewirtschaftung von Wiesen und Äckern zur Folge, da schwere Landmaschinen in den Untergrund einbrechen. Die durch die Störungen bedingten sehr guten Wasserwegsamkeiten führen offensichtlich nicht nur zum Versinken von Flusswasser in einer Größenordnung zwischen 100 und 150 l/s, sondern auch zu einem Stofftransport, der die Erdfälle zur Folge hat.

## 8.2 Grundwasserhaushalt

### 8.2.1 Grundwasserneubildung

Der Arbeitskreis Grundwasserneubildung (1977) stellte verschiedene Methoden zur Ermittlung der Grundwasserneubildung und deren Gewichtung bei unterschiedlichen Bedingungen zusammen. Für die Bestimmung der Grundwasserneubildung in Festgesteinen mit Vorflutern werden das MoMNO<sub>r</sub>-Verfahren (Kille 1970), das A<sub>0</sub>-Linienverfahren (Natermann 1951), die Trockenwetterabflussmessungen (Richter & Lillich 1975) und die Wasserhaushaltsgleichung vorgeschlagen (in Hötting 1996).

Nachfolgend wird das MoMNO<sub>r</sub>-Verfahren nach Kille (1970) verwendet. Das Verfahren baut auf dem MoMNO<sub>r</sub>-Verfahren von Wundt (1958) auf. Beide Methoden legen zugrunde, dass in Trockenzeiten, wie dieses in Spätsommern der Fall ist, der Abfluss ausschließlich aus dem Grundwasser gespeist wird. Der MoMNO<sub>r</sub>-Wert ist dabei das arithmetische Mittel aus allen dokumentierten Monats-NO<sub>r</sub>-Werten, wobei mindestens ein zehnjähriger Beobachtungszeitraum berücksichtigt werden soll. Beim MoMNO<sub>r</sub>-Verfahren werden auf stochastischem Wege Abflüsse, die über einen vermeintlichen Anteil von Oberflächenabfluss verfügen (z.B. Monate mit Schmelzwasserabfluss), auf den Grundwasseranteil des Abflusses reduziert. Der MoMNO<sub>r</sub>-Wert liegt daher immer unter dem MoMNO<sub>r</sub>-Wert. Der Sommer-MNO<sub>r</sub>-Wert (SoMNO<sub>r</sub>) ist nach Wundt (1958) der kleinste mittlere Grundwasserabfluss aus einem Einzugsgebiet.

Für das Gebiet des vulkanischen Vogelsberges bestimmte Mattheß (1970) erstmals eine Niedrigwasserspende von  $3,5 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$ . Die Abflussmessun-

gen wurden vom 17.09.1962 bis zum 09.10.1962 durchgeführt. Der von ihm ermittelte Gesamtabfluss betrug  $7,4 \text{ m}^3/\text{s}$ . Kleinräumigere Untersuchungen zeigen, dass es zu starken Abweichungen von diesem Wert kommt (Wasserwirtschaftlicher Rahmenplan Nidda 1968, Mattheß 1970, Walter 1974, Diederich 1975).

Wiegand (1977) gibt aufgrund von Abflussmessungen im Niddatal und aufgrund von Betriebserfahrungen aus Wasserwerken einen Wert von  $5,5 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$  für den mittleren jährlichen Grundwasserabfluss an. Nach Wiegand ist zu erwarten, dass die Grundwasserneubildungsspende in Abhängigkeit von der Niederschlagsverteilung und den hydrogeologischen Verhältnissen im Hohen Vogelsberg größer und am Rand des Vogelsberges kleiner als  $5,5 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$  ist.

Die für die Vogelsberg-Region relevanten Abflusspegel sind in der Tab. 8-1 mit ihren MoMNO<sub>r</sub>-, MoMNO<sub>r</sub>- und SoMNO<sub>r</sub>-Werten aufgelistet. Die Stichtagsmesswerte und die MoMNO<sub>r</sub>-Werte der Pegel wurden als Referenzpunkte zur Ermittlung der MoMNO<sub>r</sub>-Werte der untersten Messpunkte jeden Abflusssystem im Untersuchungsgebiet verwendet. Die während der Abflussmesskampagnen gemessenen Werte wurden dabei mit den zum selben Zeitpunkt registrierten Abflusspegelwerten ins Verhältnis gesetzt und diese wiederum auf die langjährigen MoMNO<sub>r</sub>-Werte umgerechnet (Leßmann 2001a).

Bei der Bestimmung der MoMNO<sub>r</sub>-Werte wurden Berechnungen mit reellen Abflüssen ( $Q_{\text{reell}}$ ) und mit korrigierten Abflüssen ( $Q_k$ ) durchgeführt.

Tab. 8-1. Gewässerkundliche Hauptzahlen

Meßstellen-nummer	Name	Gewässer	Rechtswert	Hochwert	TK 50	A <sub>Eo</sub> [km <sup>2</sup> ]	Meßzeit-raum	NC [m <sup>3</sup> ]
24780757	Steinau	Kinzig	353400	557610	5622	116,2	1961/90	0,11
24781909	Bad Soden	Salz	352613	557268	5722	89,1	1966/90	0,07
24782800	Weilers	Bracht	352222	557130	5721	111,9	1972/90	0,21
24783358	Kassel	Bieber	351962	556408	5721	79,9	1959/90	0,11
24784055	Hain-Gründau	Gründau	350937	556660	5720	10,4	1966/90	0,00
24784259	Hanau	Kinzig	349623	555513	5819	921,2	1957/90	1,00
24810155	Schotten 1	Nidda	350782	559487	5520	26,9	1971/90	0
24810202	Schotten 2	Läunsbach	350769	559360	5520	6,0	1971/90	0
24810257	Rainrod	Nidda	350656	559361	5520	35,0	1986/92	0,07
24810359	Eichelsachsen	Eichelbach	350870	559144	5520	23,6	1965/90	0,00
24810600	Unter-Schmitten	Nidda	350181	558889	5520	124,0	1967/90	0,23
24820206	Ruppertsburg	Horloff	349716	559774	5419	41,2	1966/89	0,01
24830050	Nieder-Florstadt	Nidda	348976	557584	5619	526,3	1961/90	0,30
24840407	Münster	Wetter	349381	560110	5419	86,2	1966/90	0,08
24840600	Muschenheim	Wetter	348552	559325	5518	174,7	1973/90	0,08
24841206	Friedberg	Usa	348403	557728	5618	183,9	1962/90	0,08
24841250	Bruchenbrücken	Wetter	348489	557516	5618	513,1	1961/90	0,22
24850058	Ilbenstadt	Nidda	348550	557191	5718	1072,6	1958/90	0,68
24860109	Steinberg	Nidder	351000	558587	5520	24,6	1964/90	0,00
24861054	Büdingen	Seemenbach	350750	557240	5720	93,8	1963/90	0,11
24861407	Windecken	Nidder	349109	556518	5719	392,6	1956/90	0,32
24870055	Bad Vilbel	Nidda	348158	556071	5818	1619,3	1956/90	1,20
25820201	Freienseen	Seenbach	350366	560238	5420	11,0	1958/89	0
25821259	Ober-Ofleiden	Ohm	349878	562215	5219	317,3	1956/89	0,40
25831605	Lollar	Lumda	348011	561218	5318	128,9	1961/89	0,07
25832357	Oberkleen	Cleebach	347146	559170	5517	23,5	1957/89	0,00
42110304	Hettenhausen	Fulda	355788	559074	5524	55,5	1972/94	0,08
42260250	Rothemann	Döllbach	355005	559245	5524	68,7	1971/94	0,07
42350057	Kümmertzell	Fulda	354514	560712	5423	561,0	1954/94	0,68
42360550	Lütterz	Lüder	354184	560594	5423	181,5	1960/94	0,14
42410104	Schlechtenwegen	Altefeld	353034	560058	5422	29,1	1972/94	0,01
42430156	Bad Salzschriff	Altefeld	353581	560983	5424	135,1	1965/94	0,04
42880458	Alsfield	Schwalm	352019	562473	5221	131,2	1968/94	0,25
42881009	Angenrod	Antreff	351465	562525	5221	58,7	1976/92	0,11

Die korrigierten Abflüsse ( $Q_k$ ) bestehen aus den reellen Abflüssen ( $Q_{reil}$ ) und der Wassermenge, die aus den oberirdischen Teileinzugsgebieten des Abflusssystem in den Untergrund versickert ( $Q_v$ ). Entnahmen ( $Q_A$ ) aus dem oberirdischen Gewässersystem wurden dem Abfluss ( $Q_k$ ) hinzugefügt. Einleitungen ( $Q_e$ ) in die Gewässer, wie z.B. aus Klär-

anlagen, wurden aus den korrigierten Abflüssen ( $Q_k$ ) herausgerechnet. Es werden somit reelle MoMNO<sub>r</sub>-Werte (MoMNO<sub>r, reil</sub>) und korrigierte MoMNO<sub>r</sub>-Werte (MoMNO<sub>r, k</sub>) unterschieden. Da eine eindeutige Zuordnung der entnommenen und abgeleiteten Wassermengen ( $Q_c$ ) zu einem oberirdischen Teileinzugsgebiet bei den teilweise

	<b>MNQ</b>	<b>MQ</b>	<b>MHQ</b>	<b>HQ</b>		<b>Nq</b>	<b>MNq</b>	<b>Mq</b>	<b>MHQ</b>	<b>Hq</b>
Datum	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	[m³/s]	Datum	[l/(s·m²)]	[l/(s·m²)]	[l/(s·m²)]	[l/(s·m²)]	[l/(s·m²)]
08.1964	0,363	1,490	32,90	51,8	03.11.1977	1,64	3,12	12,82	283,1	445,8
08.1976	0,174	1,200	23,90	38,0	24.12.1967	0,79	1,95	13,47	268,2	426,5
07.1976	0,377	1,540	32,50	53,6	07.02.1984	2,32	3,37	13,76	290,4	479,0
08.1976	0,193	0,776	10,70	21,3	10.12.1966	1,38	2,42	9,71	133,9	266,6
08.1976	0,145	0,531	11,70	30,8	11.08.1981	5,77	13,94	51,06	1125,0	2961,5
08.1964	2,330	10,100	72,40	160,0	25.12.1967	1,09	2,53	10,96	78,6	173,7
08.1975	0,015	0,434	9,44	24,2	03.11.1977	0	0,56	16,13	350,9	899,6
06.1992	0,001	0,058	0,97	1,8	11.08.1981	0	0,17	9,62	160,5	305,1
10.1992	0,087	0,411	2,64	5,1	26.03.1987	2,09	2,49	11,74	75,5	145,1
07.1976	0,019	0,377	9,76	22,0	24.12.1967	0,13	0,81	15,97	413,6	932,2
06.1974	0,431	1,610	25,10	43,6	08.06.1984	1,85	3,48	12,98	202,4	351,6
08.1976	0,051	0,367	4,61	10,8	11.08.1981	0,24	1,24	8,91	111,9	262,1
08.1976	0,797	3,290	20,00	37,6	12.08.1981	0,57	1,51	6,25	38,0	71,4
07.1976	0,225	0,762	13,10	25,4	11.08.1981	0,93	2,61	8,84	152,0	294,7
07.1976	0,327	1,060	8,01	12,5	12.08.1981	0,52	1,87	6,07	45,9	71,6
09.1973	0,237	1,190	17,90	66,0	11.08.1981	0,44	1,29	6,47	97,3	358,9
08.1964	0,864	2,980	22,40	63,2	11.08.1981	0,43	1,68	5,81	43,7	123,2
08.1976	1,810	6,370	40,40	85,0	11.08.1981	0,63	1,69	5,94	37,7	79,2
06.1976	0,027	0,451	8,99	22,5	24.12.1967	0,20	1,10	18,33	365,4	914,6
07.1963	0,274	1,050	20,10	34,9	03.11.1977	1,17	2,92	11,19	214,3	372,1
07.1976	0,838	3,670	15,20	19,8	25.02.1970	0,82	2,13	9,35	38,7	50,4
08.1976	3,060	10,900	55,50	91,0	11.08.1981	0,74	1,89	6,73	34,3	56,2
06.1976	0,006	0,165	3,23	12,2	24.12.1967	0	0,55	15,00	293,6	1109,1
08.1964	0,806	3,560	67,50	160,0	04.11.1977	1,26	2,54	11,22	212,7	504,3
07.1976	0,245	0,942	21,50	53,1	23.11.1984	0,54	1,90	7,31	166,8	411,9
06.1964	0,015	0,167	3,78	15,8	11.08.1981	0,09	0,64	7,11	160,9	672,3
08.1976	0,177	0,941	14,10	26,0	21.07.1980	1,44	3,19	16,95	254,1	468,5
08.1993	0,178	0,905	15,80	30,4	07.02.1984	1,14	2,59	13,17	230,0	442,5
09.1991	1,580	6,660	88,90	170,0	24.12.1967	1,21	2,82	11,87	158,5	303,0
12.1959	0,366	2,260	58,60	123,0	07.02.1984	0,77	2,02	12,45	322,9	677,7
08.1973	0,043	0,523	18,30	49,0	07.02.1984	0,34	1,48	17,97	628,9	1683,8
07.1976	0,196	1,740	41,90	100,0	25.12.1967	0,30	1,45	12,88	310,1	740,2
09.1974	0,346	1,140	30,40	64,1	12.01.1993	1,91	2,64	8,69	231,7	488,6
09.1991	0,190	0,632	9,13	20,4	11.08.1981	1,99	3,24	10,77	155,6	347,5

tiefen Wassergewinnungsanlagen nicht möglich ist, wurden Grundwasserentnahmen nur bei der Berechnung der Grundwasserneubildung berücksichtigt.

Berechnungsverfahren zur Ermittlung der  $MoMNO_{rk\ reell}$  und  $Q_{k\ reell}$ -Werte für die einzelnen

Abflusssysteme:

$$MoMNO_{rk\ reell} = Q_{k\ reell} / (Q_p \cdot MoMNO_{r\ p}) \quad [l/s, m^3/s]$$

mit  $MoMNO_{rk\ reell}$ :  $MoMNO_{rk}$ -Wert des Abflusssystems,  
 $MoMNO_{r\ p}$ :  $MoMNO_{r}$ -Wert des Referenzabflusssystems,

- $Q_{k\text{ reell}}$ : korrigierter gemessener Abfluss am untersten Messpunkt des Abflusssystemes an einem Stichtag,  
 $Q_p$ : gemessener Abfluss des Abflusspegels am Stichtag.

$$Q_{k\text{ reell}} = Q_{\text{reell}} + Q_v - Q_E + Q_A \quad [l/s, m^3/s]$$

- mit  $Q_{k\text{ reell}}$ : korrigierter Abfluss,  
 $Q_{\text{reell}}$ : reeller Abfluss,  
 $Q_v$ : Versickerung aus dem Abflusssystem,  
 $Q_E$ : Einleitungen in das Abflusssystem,  
 $Q_A$ : Entnahmen aus dem Abflusssystem.

Das zur Deckung des regionalen Bedarfs geförderte Grundwasser (rd. 29 Mio. m<sup>3</sup>/a) wird dem System über Kläranlagen zum Teil wieder zugeführt. Die Reduktion des Abflusses um die Einleitungen durch Kläranlagen gewährleistet, dass Bilanzglieder nicht doppelt berücksichtigt werden.

Der gemessene Niedrigwasserabfluss liegt bei 8,77 m<sup>3</sup>/s, das entspricht einer Niedrigwasser-spende von 3,0 l/(s·km<sup>2</sup>). Die Grundwasserneubildungsspende für das durch die Abflussmessungen

untersuchte Arbeitsgebiet (2889 km<sup>2</sup>, vulkanischer Vogelsberg + Randgebiete) beträgt im Mittel 3,7 l/(s·km<sup>2</sup>) (117 mm/a). Unter Berücksichtigung der rd. 76 Mio. m<sup>3</sup>/a Grundwasser, die z.T. aus dem Gebiet abgeleitet werden, erhöht sich die Grundwasserneubildungsspende auf rd. 4,5 l/(s·km<sup>2</sup>) (142 mm/a). Der mittlere grundwasserbürtige Abfluss hat eine Höhe von rd. 13 m<sup>3</sup>/s. Das entspricht einer Grundwasserneubildung von rd. 410 Mio. m<sup>3</sup>/a. Bei einem für den vulkanischen Vogelsberg ermittelten Niederschlag von 770 mm/a (rd. 1,14 Mrd. m<sup>3</sup>/a) beträgt der Anteil der Grundwasserneubildung am Jahresniederschlag 19%.

Das unter wasserwirtschaftlichen Gesichtspunkten betrachtete gewinnbare Grundwasser-dargebot wird im Vogelsberg aufgrund von Betriebserfahrungen auf ca. 75% der Grundwasserneubildung (Diederich et al. 1991) beziffert und beträgt damit rd. 307 Mio. m<sup>3</sup>/a. Vom gewinnbaren Grundwasserangebot werden bei einer Gesamtförderung von rd. 76 Mio. m<sup>3</sup>/a etwa 25% genutzt. Somit werden von der mittleren Grundwasserneubildung etwa 19% gefördert.

Beim Vergleich der Grundwasserneubildungsspenden einzelner Abflusssysteme (Tab. 8-2) fallen

**Tab. 8-2.** Grundwasserneubildung, ohne Berücksichtigung der überregionalen Grundwasserentnahmen.

Abflusssystem	$A_E$ [km <sup>2</sup> ]	MoMNO <sub>r,p</sub> [l/s]	$Q_p$ [l/s]	$Q_{\text{reell}}$ [l/s]	$Q_v$ [l/s]	$Q_{k\text{ reell}}$ [l/s]	MoMNO <sub>k, reell</sub> [l/(s·km <sup>2</sup> )]	MoMNO <sub>k, reell</sub> [l/(s·km <sup>2</sup> )]
Antrift	70,7	260	196	326	0	325,5	432	6,1
Bracht	112,0	570	409	409	-152,3	561,3	782	7,0
Gründau	53,4	227	257	245	0	245,0	216	4,1
Horloff	287,2	288	372	372	0	372,0	288	1,0
Kemmete/Fliede	61,3	780	660	136	0	136,3	161	2,6
Lauter/Altefeld	224,8	435	220	554	-30,7	585,0	1157	5,1
Lüder	148,4	780	660	522	0	521,9	617	4,2
Lumda/Zwester Ohm	202,3	406	337	441	-41,2	482,6	582	2,9
Nidda	238,1	972	1256	1256	-159,3	1415,3	1095	4,6
Nidder/Bleichenbach	133,9	112	97	462	-13,8	475,6	549	4,1
Ohm/Gleen	424,4	1230	759	951	-45,9	997,3	1617	3,8
Salz	88,1	320	341	352	0	352,0	330	3,7
Schwalm	166,5	475	430	512	-6,6	518,1	572	3,4
Seemenbach	111,8	410	415	525	-0,3	525,3	519	4,6
Steinaub./Mordgrab.	80,8	320	341	487	-3,0	489,6	459	5,7
Umbach	20,1	320	341	52	0	52,1	49	2,4
Wetter	329,0	910	860	860	0	860,0	910	2,8
Wieseck	135,9	406	337	312	0	312,4	376	2,8

Unterschiede auf, die mit der Stellung des Abflusssystems im hydrogeologischen Gesamtsystem zusammenhängen oder z.T. auch durch die Grundwasserförderung zu erklären sind. Das Horloff-Abflusssystem weist so mit  $1,0 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$  die niedrigste mittlere Grundwasserneubildungsspende auf. Korrigiert um die rd. 18 Mio.  $\text{m}^3/\text{a}$  Grundwasser, die im Wasserwerk Inheiden gefördert werden, steigt die Spende auf  $3,3 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$  an.

Die beiden höchsten Grundwasserneubildungsspenden (Antritt:  $6,1 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$ , Bracht  $7,0 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$ ) liegen direkt auf einer Nord-Süd-Achse durch den Hohen Vogelsberg. Beide Abflusssysteme sind ebenfalls Nord-Süd ausgerichtet. Der Grund hierfür ist in einem Nord-Süd verlaufenden Störungssystem zu sehen, das den größten Teil des im Oberwald neu gebildeten Grundwassers dräniert. Die aufgrund klimatischer, pedologi-

scher und hydrogeologischer Gründe hohe Grundwasserneubildung (Kap. 6) im Oberwald gelangt nur zu einem Teil in die Bäche der Oberwaldzone. Das Grundwasser sickert durch die Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke bis in die Zone der Durchgehenden Grundwassersättigung. Es ist anzunehmen, dass die mittlere Grundwasserneubildungsspende in der Oberwaldzone über  $7 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$  liegt.

Eine Grundwasserneubildungsspende von  $3,7 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$  ohne Berücksichtigung der Grundwasserförderung und die zum größten Teil noch hohen Abflussspenden in den Gebieten der überregionalen Grundwasserförderung zeigen, dass bei den heutigen wasserwirtschaftlichen Verhältnissen keine Überförderung des Grundwasservorkommens der Vogelsberg-Region gegeben ist.

### 8.2.2 Verdunstung und oberirdischer Abfluss

Die Verdunstung setzt sich aus der Summe der Evaporation, der Transpiration und der Interzeption zusammen und wird deshalb als Evapotranspiration (ET) bezeichnet.

$$V = E + T + I \quad [\text{mm/a}]$$

- mit V: Verdunstung [mm/a],
- E: Evaporation [mm/a],
- T: Transpiration [mm/a],
- I: Interzeption [mm/a].

Es werden ferner die potenzielle Evapotranspiration ( $ET_{\text{pot}}$ ) und die reelle Evapotranspiration ( $ET_{\text{reell}}$ ) unterschieden. Unter der potenziellen Evapotranspiration wird die maximal mögliche Verdunstungshöhe, die sich unter gegebenen meteorologischen Bedingungen über einer Fläche ergibt, verstanden. Die reelle Verdunstung ist die tatsächliche Verdunstung (Hölting 1996).

Nach Turc (zit. in Gray 1970) kann die reelle Evapotranspiration mit der folgenden Formel berechnet werden:

$$ET_{\text{reell}} = N / [0,9 + (N/J_t)^2]^{0,5} \quad [\text{mm/a}]$$

- mit N: Jahresniederschlag [mm],
- $J_t$ :  $300 + 25 \cdot t + 0,05 \cdot t^3$ ,
- t: Jahresmittel der Temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Bei einem für das Arbeitsgebiet ermittelten mittleren Jahresniederschlag von  $770 \text{ mm/a}$  und einem Jahresmittel der Temperatur von  $7,5^{\circ}\text{C}$  ergibt sich eine reelle Evapotranspiration von  $437 \text{ mm/a}$  (rd.  $647 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$ ). Das entspricht einem Anteil von 57% am Jahresniederschlag.

Nach der modifizierten hydrologischen Grundgleichung kann der oberirdische Abfluss wie folgt berechnet werden:

$$A_o = N - V - A_u$$

- mit  $A_o$ : oberirdischer Abfluss,
- $A_u$ : Anteil am Abfluss, der in den Untergrund und das Grundwasser übergeht.

Unter Berücksichtigung eines unterirdischen Abflusses ( $A_u$ ) von  $142 \text{ mm/a}$  errechnet sich daraus ein oberirdischer Abfluss von  $191 \text{ mm/a}$  mit einem Anteil von 25% am mittleren Jahresniederschlag. Die Menge des im Mittel aus dem Arbeitsgebiet

abfließenden Oberflächenwassers, das nicht in den Untergrund sickert, liegt bei rd. 281 Mio. m<sup>3</sup>/a. Der Gesamtabfluss ( $A_o + A_u$ ) aus dem Untersuchungsgebiet beträgt somit 333 mm/a (rd. 492 Mio. m<sup>3</sup>/a). Bei einem Anteil von 43% am Jahres-

niederschlag liegt der Wert über dem von Baumgartner & Liebscher (1996) angegebenen Mittel von 318 mm/a (38%) des mittleren Niederschlags in Westdeutschland.

### 8.2.3 Abflusspendendifferenzen zwischen 60er und 90er Jahren

Mattheß (1970) führte Anfang der 60er Jahre (17.09.–09.10.1962) Abflussmessungen in der Vogelsberg-Region durch (Abb. 8-3, CD Anl. 7). Die erste Hälfte der 60er Jahre kann als niederschlagsarm eingestuft werden (Abb. 2-4, Abb. 8-3).

Die Grundwasserstandsganglinie der Landesgrundwasserdienstmessstelle Lauter (Abb. 6-29) zeigt beispielhaft, dass im Vogelsberg während des Messzeitraumes 1962 ein geringerer Grundwasserstand vorlag als dieses bei den Abflussmesskampagnen in den 90er Jahren der Fall war. Der Unterschied der Niedrigwasserspende für den gesamten Vogelsberg aus dem Spätsommer 1962 ( $q_{\text{reell}} < 3,5$  l/(s·km<sup>2</sup>)) und den neueren Messungen ( $q_{\text{reell}} = 3,0$  l/(s·km<sup>2</sup>)) kann durch die zunehmende anthropogene Überprägung erklärt werden. Die Grundwassergewinnung hat hierbei wahrscheinlich einen nicht unerheblichen Anteil. Der Vergleich der Abflussmessungen 1962 mit denen in den 90er Jahren ist gerade aufgrund der anthropogenen Überprägung des Wasserhaushaltes (Kap. 8.3) äußerst schwierig. Die Abflusspendendifferenzkarte (Abb. 8-4, CD Anl. 8) zeigt daher ein uneinheitliches Bild. Für das Niederschlagsgebiet 61 wurde des Weiteren keine Abflusspendendifferenz berechnet, da keine Angaben über korrigierte Wassermengen zur Verfügung standen und damit eine Berechnung des realen Abflusses ( $Q_{\text{reell}}$ ) nicht möglich war.

#### Oberwaldzone

Die besondere pedologische Situation der Oberwaldzone mit einem überwiegenden Anteil an Lockerbraunerden, die eine extrem hohe Feldkapazität besitzen, führt zu einer Abpufferung der in diesem Bereich fallenden Niederschläge (Kap. 6.3). Es ist somit zu erwarten, dass sich kurzfristige Niederschlagstrends nicht auf den Grundwasserabfluss aus der Oberwaldzone aus-

wirken. Da die Sommerniederschläge fast ausschließlich durch die Evapotranspiration aufgebraucht werden, ist in verschiedenen Spätsommern mit jeweils ähnlich hohen Abflüssen aus der Oberwaldzone zu rechnen.

#### Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke

Die oberen Grundwasserstockwerke aus der Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke werden in Trockenzeiten zum überwiegenden Teil aus der Oberwaldzone gespeist (Kap. 6.4.2.4). In diesem Bereich gelten daher dieselben Voraussetzungen wie in der Oberwaldzone. Es wird daher von geringen Abflusspendendifferenzen ausgegangen. Wenn dennoch negative Abflusspendendifferenzen vorkommen, sind diese zum Teil durch Grundwasserentnahmen (z.B. Niederschlagsgebiet 15, 32, 79) oder durch den Bau von Kläranlagen (z.B. Niederschlagsgebiet 194) erklärbar. Wird Abwasser aus einem Niederschlagsgebiet zu einer Kläranlage geleitet, die außerhalb des Gebietes liegt, führt dies in dem Niederschlagsgebiet zu einer Abflussminderung (Kap. 8.3). Gebiete, in denen sich eine solche Sammelkläranlage befindet, weisen dagegen eine Abflusszunahme auf (z.B. Niederschlagsgebiet 196). Dieselben Bedingungen gelten, wenn Einzelhaushalte früher über Sickergruben für ihr Abwasser verfügten und diese heute an Kläranlagen angeschlossen sind.

#### Zone der Durchgehenden Grundwassersättigung

Oberirdische Teileinzugsgebiete, die eine Anbindung an ergiebige Grundwasserstockwerke der tieferen Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke oder der Zone der Durchgehenden Grundwassersättigung aufweisen und über eine Abflusszunahme verfügen, spiegeln die oben beschriebene Niederschlagsituation wider (Abb. 8-1,

8-2). Beispielhaft hierfür ist das 81,8 km<sup>2</sup> große Niederschlagsgebiet 13 (Mattheß 1970). Es umfasst insgesamt 11 Wassergewinnungsanlagen. Der Einfluss durch die Brunnen und Quelfassungen, die Grundwasser entnehmen, ist jedoch geringer als die Zunahme des Abflusses aus dem durch die höheren Niederschläge gebildeten Grundwasser. Die Grundwasserentnahme aus dem Gebiet betrug 1995 rd. 105 000 m<sup>3</sup>/a.

Niederschlagsgebiete, die über eine Anbindung an die Zone der Durchgehenden Grundwassersättigung verfügen und deren Einzugsgebiete nicht zum größten Teil in der Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke liegen, wie die Niederschlagsgebiete 16, 53 und 103, haben hohe Abflusspendendifferenzen zwischen +3,5 l/(s·km<sup>2</sup>) und +4,3 l/(s·km<sup>2</sup>). Die hohen negativen Abflusspendendifferenzen [-5 l/(s·km<sup>2</sup>) und mehr] kön-

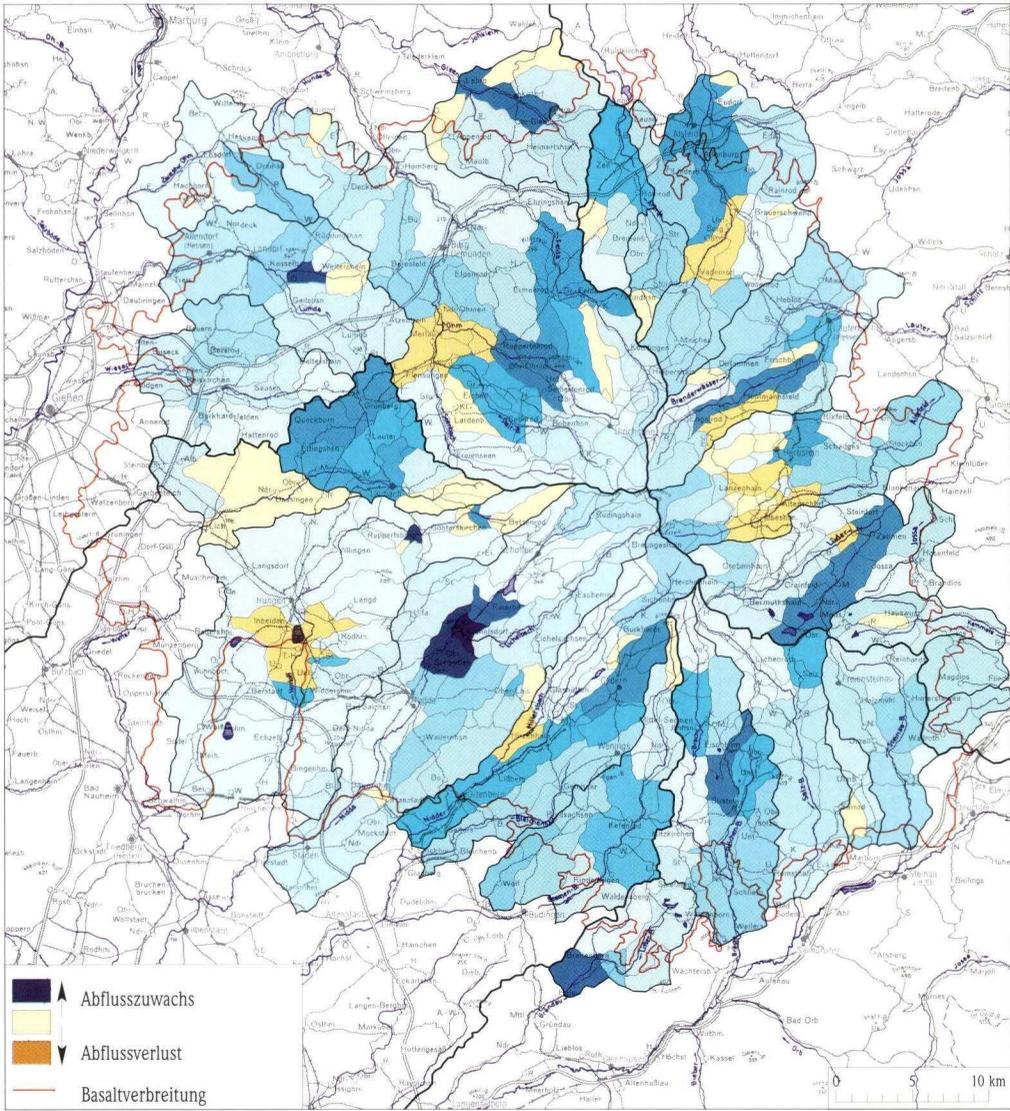


Abb. 8-2. Abflusspenden und Abflussabgaben ( $q_{\text{frei}}$ , Messungen 09/62–10/62) nach Mattheß (1970).

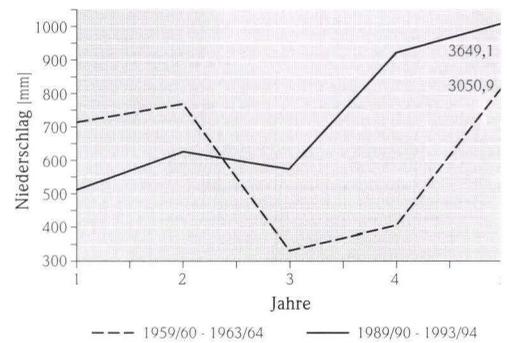
nen zumeist mit Grundwasserentnahmen korreliert werden. Die größte Negativentwicklung ist beim Niederschlagsgebiet 36 zu verzeichnen. Die Brunnen des Wasserwerkes Kohden und der Spezialpapierfabrik Ober-Schmitten wurden Mitte bis Ende der 60er Jahre gebaut. Die Gesamtentnahme betrug 1995 rd. 7,7 Mio. m<sup>3</sup>/a. Während Mattheß (1970) noch einen Abflusszuwachs von 262 l/s feststellte, wurde im Oktober 1994 ein Abflussverlust von rd. 90 l/s gemessen.

Im Niederschlagsgebiet 33 befindet sich das Wasserwerk Rainrod (rd. 4 Mio. m<sup>3</sup>/a). Die Abflusszunahme in diesem Gebiet ist trotz der erheblichen Entnahmemenge des überregionalen Wasserwerkes auf die Grundwasseranreicherung durch die Niddatalsperre in Höhe von ca. 4,7 Mio. m<sup>3</sup>/a zu erklären (Kap. 8.3).

Das Beispiel der Südgruppe des Wasserwerkes Neuenschmidten (Niederschlagsgebiet 21) zeigt, dass hohe Abflussabgaben nicht in jedem Fall auf Grundwasserentnahmen zurückzuführen sind. Die Entnahme aus diesem Gebiet verstärkt lediglich ein natürliches Phänomen (Kap. 8.1). Es bleibt jedoch unklar, warum Mattheß (1970) einen Abflusszuwachs von rd. 160 l/s messen konnte, während zu späteren Zeitpunkten Abflussverluste in der Größenordnung zwischen rd. 100 l/s (Scharpf & Quadflieg 1988) und 150 l/s festgestellt wurden. Ein Teil der Differenz kann gegebenenfalls durch den Abwasserverband Bracht erklärt werden. Sämtliche Gemeinden im oberirdischen Einzugsgebiet der Bracht gehören zu diesem Abwasserverband, der seine Ab-

wässer der Kläranlage bei Wächtersbach zuleitet.

Die hohe negative Abflusspendendifferenz im Niederschlagsgebiet 26 ist möglicherweise zu einem Teil auf die Grundwasserförderung im Bereich des Gettenbachtals zurückzuführen. Jedoch liegt die Abflussabnahme (116 l/s) deutlich über der mittleren Grundwasserförderung (41 l/s). Die Grundwasserpotenziale (CD Anl. 2) lassen keine Fließrichtung vom Litterbach- bzw. Gründautal zum Gettenbachtal erkennen. Grundwasserstandsganglinien lassen jedoch vereinzelt eine Beeinflussung vermuten. Abflussmessungen bei unterschiedlichen hydraulischen Bedingungen mit kleinen Abständen zwischen den Abflussmessstellen könnten in den Niederschlagsgebieten 21 und 26 zur Klärung der hydrogeologischen Verhältnisse beitragen.



**Abb. 8-3.** Niederschlagsstation Grebenhain, Vergleich der hydrologischen Winterhalbjahre 1959/60 bis 1963/64 mit 1989/90 bis 1993/94.

### 8.3 Anthropogene Eingriffe in den Wasserhaushalt

Die Vogelsberg-Region wird seit Jahrhunderten vom Menschen besiedelt und ist daher eine Kulturlandschaft. Weitgehend unbeeinflusste Naturräume sind heute nur noch in Rückzugsgebieten, wie den Erlenbrüchen bei Sausel und Rauchel, den Bruchwiesen im Salzgebiet und den Hochmooren im Oberwald zu finden.

Anthropogene Einflüsse auf den Wasserhaushalt werden nach Baumgartner & Liebscher (1996) in zwei Kategorien untergliedert. Zum einen die primären, bewussten Eingriffe und zum anderen die

sekundären Eingriffe, die aus Massnahmen und Veränderungen resultieren, die nur indirekt und damit nicht vordergründig mit dem Wasserhaushalt in Zusammenhang stehen.

Zu den primären Eingriffen gehören die wasserwirtschaftlichen Massnahmen. Für den Vogelsberg sind folgende zu nennen:

- Grundwasserentnahme (1997: rd. 76 Mio. m<sup>3</sup>/a),
- Flussbegradigungen, -kanalisierungen und -umleitungen,
- Stauanlagen (z.B. Niddatalsperre, Gederner See),

- Wasserkraftwerke mit Wasserhaushaltung (Wasserkraftwerk Lißberg, Niddatalsperre),
- Entwässerungen (z.B. Dränungen),
- Einleitungen (z.B. Kläranlagen),
- Entnahmen aus Oberflächengewässern (z.B. durch Landwirtschaft und Privathaushalte)
- Hochwasserrückhaltebecken (z.B. Ulfa).

Bei den sekundären Eingriffen ist an erster Stelle die Landnutzung zu nennen. Im Vogelsberg finden folgende unbewusste Eingriffe in den Wasserhaushalt statt:

- Flächenumnutzungen (Wald zu Agrarland, Kulturwald),
- Flächenbewirtschaftungen (Veränderung von Bodenstrukturen),
- Flächenversiegelungen (Siedlungs- und Straßenbau),
- Grundwasseranreicherung (z.B. Niddatalsperre),
- Auflockerungszonen entlang von Rohrleitungen (können wie Dränungen wirken, insbesondere in Hanglagen).

Die Eingriffe sind in Bezug auf die Grundwasserneubildung unterschiedlich zu bewerten. Eine Verminderung der Geschwindigkeit des oberflächigen Abflusses durch Flussrenaturierungen, Stauanlagen und Rückhaltebecken kann im Vogelsberg je nach Lage des Gewässerabschnittes bzw. der Anlage zu einer Erhöhung der Grundwasserneubildung beitragen. Die Niddatalsperre, die sich in der Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke befindet, ist hierfür ein herausragendes Beispiel. Sie verliert im Mittel etwa 150 l/s (4,7 Mio. m<sup>3</sup>/a) an die unterlagernden Schichten.

Als ebenfalls positiv für die Grundwasserneubildung ist die Flächenumnutzung von forstwirtschaftlicher zu landwirtschaftlicher Nutzung zu bewerten. Wälder verbrauchen durch ihre hohe Transpiration große Mengen an Wasser. Ein Vergleich der Interzeptionsverdunstung zwischen landwirtschaftlichen und forstwirtschaftlichen Flächen zeigt ferner, dass unter Waldbestockung weniger Wasser zur Versickerung kommt als dies bei landwirtschaftlich genutzten Flächen der Fall ist (Brechtel & Hoyningen-Huene 1979, Hoyningen-

Huene 1983, Baumgartner & Liebscher 1996).

Einleitungen in die Gewässer werden quantitativ positiv bewertet, da sie den Abfluss erhöhen. Jedoch bedeuten Einleitungen zumeist eine Verschlechterung der Wasserqualität. Kläranlagen und hier besonders solche, die in der Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke liegen, sind daher als besonders kritisch einzustufen. Dies gilt insbesondere für Kläranlagen, deren Einleitungen bei Trockenwetterbedingungen den größten Teil des Abflusses in einen Vorfluter ausmachen (z.B. Kläranlage Ulrichstein).

Als negativer Faktor für die Grundwasserneubildung muss in erster Linie die Flächenversiegelung genannt werden. Anhand von vier Gemarkungen, die in unterschiedlichen Höhen auf einer Linie vom Oberwald zum südlichen Rand des Vogelsberges liegen, wurden Flächennutzungsanalysen der jeweiligen Gemarkungsflächen durchgeführt (Tab. 8-3). Während die Gemeinden Herchenhain und Burgbracht fast ausschließlich forst- bzw. landwirtschaftlich geprägt sind, befinden sich in Ober-Seemen und Schlierbach kleine Industrie- und Handwerksbetriebe. Die Anteile der Forst- und Landwirtschaftsflächen an den Gemarkungsflächen dominieren mit Werten zwischen 81,7% (Schlierbach) und um 89% (Herchenhain, Ober-Seemen, Burgbracht). Der Ortsteil Schlierbach nimmt unter den vier Gemarkungen durch seine Nähe zu Mittelzentren, wie Wächtersbach, Gelnhausen und Bad Soden-Salmünster sowie durch die Nahverkehrsanbindung an den Großraum Frankfurt a.M. und ihre Lage außerhalb des vulkanischen Vogelsberges, eine Sonderrolle ein. Dies spiegelt sich in der Flächennutzungsübersicht wider. Der Anteil der versiegelten Flächen (16,0%), und hierbei insbesondere der Gebäudeflächen (9,9%), liegt deutlich über den Werten der anderen Gemarkungen. Die versiegelten Flächen von Herchenhain, Ober-Seemen und Burgbracht weisen ein Mittel von lediglich 9,2% auf. Die durch Gebäude genutzten Flächen betragen zwischen 3,1 und 3,9%.

Negative Auswirkungen auf die Grundwasserneubildung sind ebenfalls durch flächig angelegte Dränungen zu befürchten (Abb. 8-5, 8-6, 8-7, 8-8). Dränungen von land- und forstwirtschaftlichen Flächen werden durchgeführt, wenn der Grundwas-

**Tab. 8-3.** Flächennutzungsanalysen.

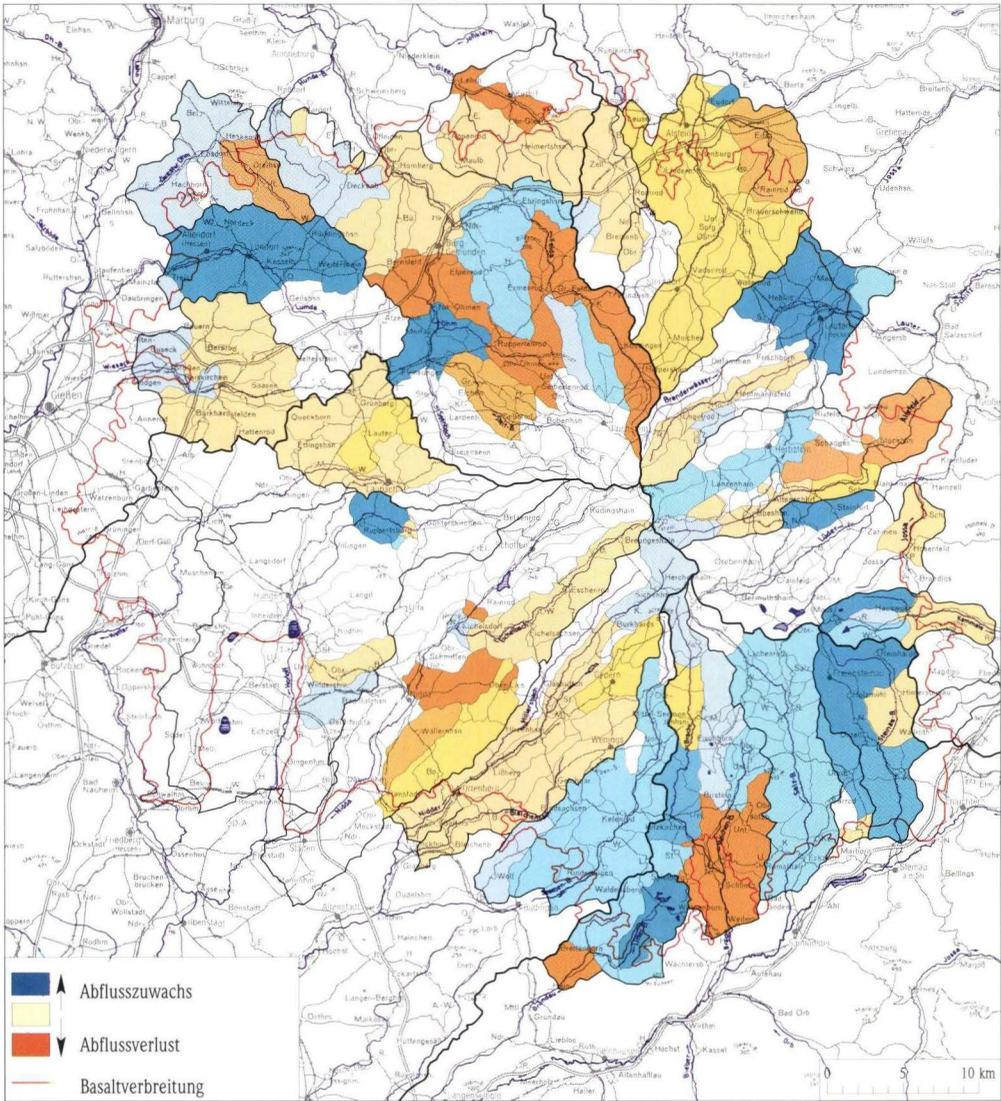
Gemarkung:	Herchenhain			Ober-Seemen		
Flächen:	Fläche [km <sup>2</sup> ]	Anteil an der Gemarkungsf.	Anteil an der land- wirtschaftl. Fläche	Fläche [km <sup>2</sup> ]	Anteil an der Gemarkungsf.	Anteil an der land- wirtschaftl. Fläche
Gemarkungsfläche	7,428	100,00		1,756	100,00	
davon gedränt	0,467	6,28		0,153	8,73	
forstwirtschaftliche Fläche	3,254	43,81		0,916	52,16	
davon dräniert	-	-		-	-	
landwirtschaftliche Fläche	3,331	44,85	100,00	0,664	37,79	100,00
davon dräniert	0,233	3,14	7,01	0,077	4,37	11,55
Ackerland	0,659	8,87	19,77	0,209	11,90	31,48
davon dräniert	0,003	0,03	0,08	0,017	0,94	2,49
Grünland	2,670	35,95	80,16	0,451	25,71	68,03
davon dräniert	0,231	3,11	6,93	0,060	3,43	9,06
Gartenfläche	0,002	0,03	0,07	0,003	0,19	0,49
versiegelte Fläche	0,752	10,12		0,157	8,96	
Gebäudefläche	0,286	3,85		0,060	3,44	
Verkehrsfläche	0,466	6,27		0,092	5,24	
Betriebsfläche	-	-		0,005	3,12	
Gewässerfläche	0,048	0,64		0,011	0,61	
Umland (z.B. Friedhöfe)	0,020	0,27		0,008	0,44	
Erholungsfläche	0,023	0,30		0,001	0,04	
Fläche mit „gestörter“ Grundwasserneubildung	0,985	13,26	7,01	0,234	13,32	11,55

Gemarkung:	Burgbracht			Schlierbach		
Flächen:	Fläche [km <sup>2</sup> ]	Anteil an der Gemarkungsf.	Anteil an der land- wirtschaftl. Fläche	Fläche [km <sup>2</sup> ]	Anteil an der Gemarkungsf.	Anteil an der land- wirtschaftl. Fläche
Gemarkungsfläche	4,120	100,00		5,790	100,00	
davon gedränt	0,528	12,82		1,250	21,58	
forstwirtschaftliche Fläche	1,240	30,11		2,995	51,72	
davon dräniert	-	-		-	-	
landwirtschaftliche Fläche	2,471	59,98	100,00	1,737	29,99	100,00
davon dräniert	0,264	6,41	10,69	0,625	10,79	35,98
Ackerland	1,209	29,34	48,91	0,819	14,15	47,16
davon dräniert	0,150	3,65	6,09	0,081	1,39	4,64
Grünland	1,261	30,61	51,04	0,899	15,53	51,76
davon dräniert	0,114	2,76	4,60	0,544	9,40	31,34
Gartenfläche	0,001	0,03	0,06	0,019	0,32	1,07
versiegelte Fläche	0,348	8,45		0,926	16,00	
Gebäudefläche	0,126	3,05		0,572	9,88	
Verkehrsfläche	0,222	5,40		0,349	6,02	
Betriebsfläche	-	-		0,006	0,45	
Gewässerfläche	0,040	0,97		0,078	1,34	
Umland (z.B. Friedhöfe)	0,109	2,64		0,040	0,69	
Erholungsfläche	0,009	0,23		0,015	0,26	
Fläche mit „gestörter“ Grundwasserneubildung	0,612	14,86	10,69	1,551	26,79	35,98

erstand bis nahe an die Bodenoberfläche reicht und eine Bewirtschaftung des Areals verhindert oder erschwert. Dränungen erfolgen in Form von

offenen Gräben oder durch Rohrleitungen. Die Grundwasseroberfläche wird dabei als Bezugsbasis für das Matrixpotenzial im Profil abgesenkt. Die



**Abb. 8-4.** Differenzen der Abflussspenden ( $q_{\text{frei}}$ ) zwischen 90er und 60er Jahren.

Entwässerung führt zu einer besseren Belüftung des Bodens und dient damit der Ertragssteigerung.

In der Vogelsberg-Region werden mit der Bedarfsdränung und der Flächendränung zwei Dränungsarten unterschieden:

Die Bedarfsdränung entwässert Flächen, die zum überwiegenden Teil des Jahres vernässt sind und bei denen durch die Vernässung eine erhebliche Er-

tragsminderung gegeben ist. Die Vernässung tritt zumeist lokal auf und hat zum Teil einen ganzjährigen Abfluss, der stark schwankend sein kann. Bedarfsdränungen führen im Bereich der dränierten Fläche zu keiner Beeinträchtigung der Grundwasserneubildung, da entweder eine Vernässung durch Wasser gering leitende Schichten (Stauwasser) oder durch eine Grundwasseranbindung gegeben ist. In

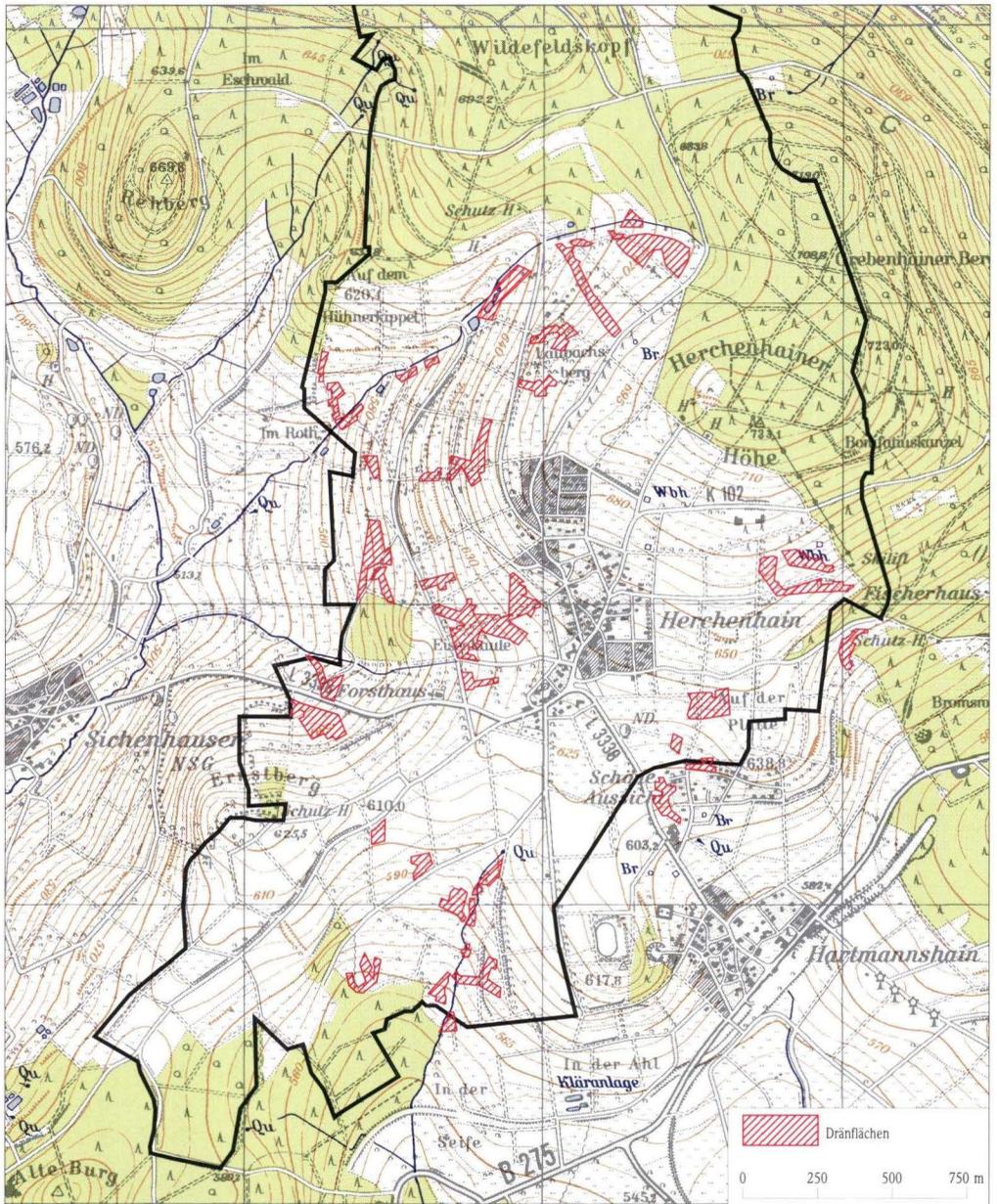


Abb. 8-5. Dränungsübersicht Gemarkung Herchenhain, Stand April 1996.

beiden Fällen ist bereits vor der Dränmaßnahme keine oder eine vernachlässigbar geringe Grundwasserneubildung vorhanden.

Findet jedoch im ungestörten Zustand ein Abfluss aus der Vernässungszone in durchlässigere

oder nicht an das Grundwasser angebundene Bereiche statt, muss die Entwässerung durch Bedarfsdränungen wie eine Grundwasserentnahme gewertet werden. Im natürlichen Zustand würde das oberflächennahe Wasser, das zu der Vernässung

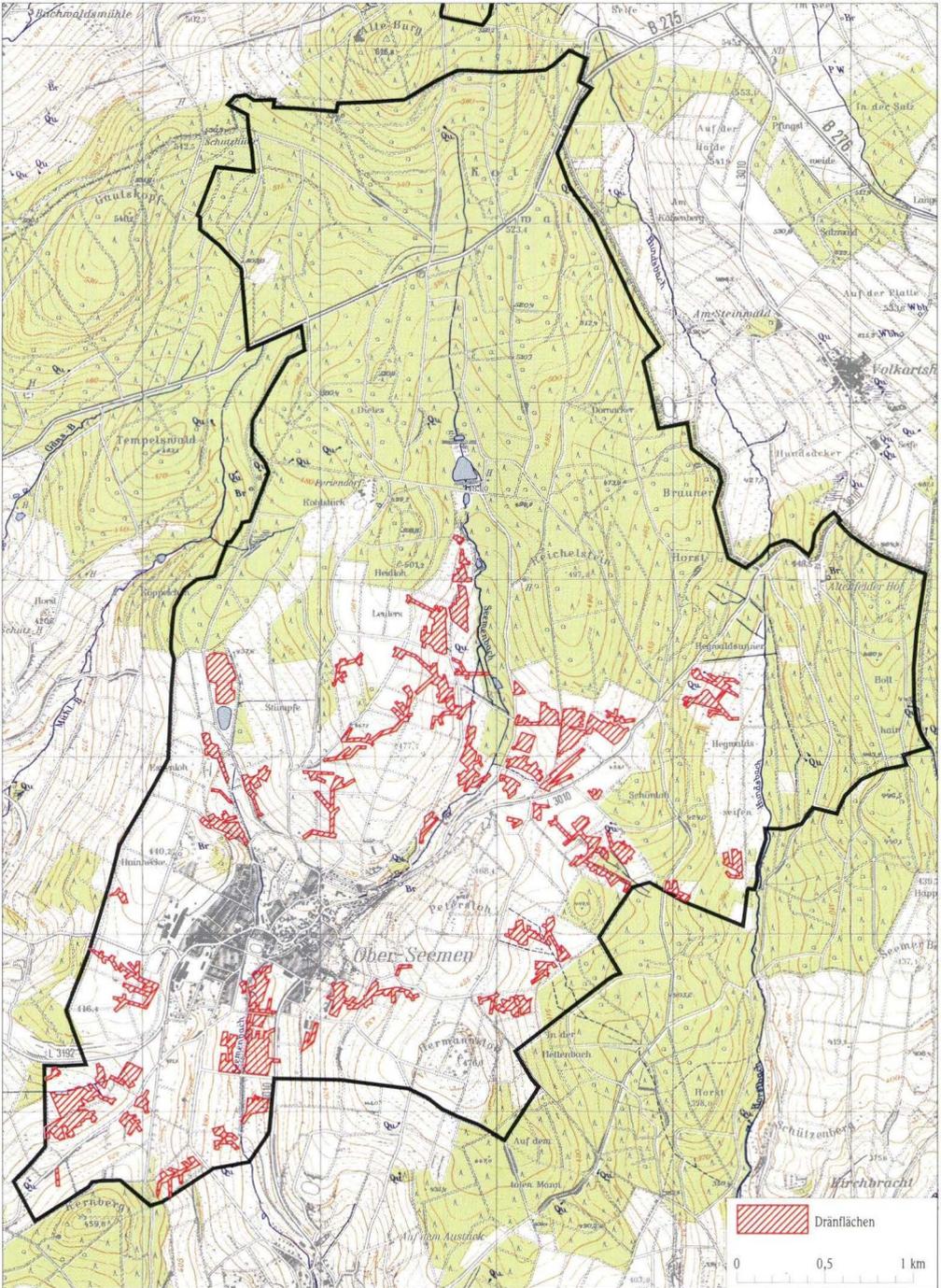
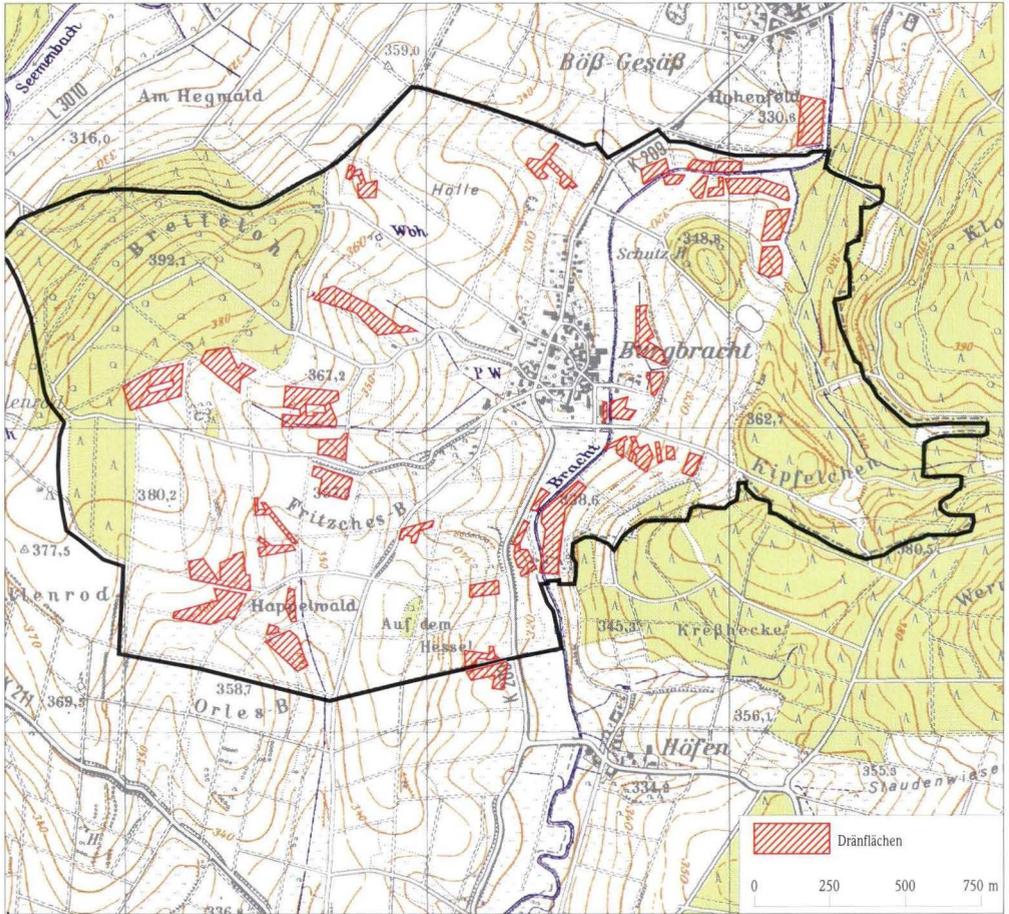


Abb. 8-6. Dränungsübersicht Gemarkung Ober-Seemen, Stand April 1996.



**Abb. 8-7.** Dränungsübersicht Gemarkung Burgbracht, Stand April 1996.

geführt hat, wenigstens zum Teil wieder dem Grundwasser zufließen. Durch eine Dränung werden die Fließwege jedoch unterbrochen und das Wasser dem Grundwassersystem entzogen.

Flächendränungen werden in Bereichen durchgeführt, die eine kurzzeitige niederschlagsabhängige Vernässung aufweisen. Diese Vernässung ist von der Bodenart abhängig. Sie kann ebenfalls durch zeitweilig hohe Grundwasserstände bedingt sein. Der Boden ist auch ohne Dränungen zum ganz überwiegenden Teil des Jahres nicht vernässt. Demzufolge findet ein Abfluss aus Flächendränungen örtlich nur sporadisch statt und ist direkt niederschlagsabhängig. Flächendränungen beeinträchtigen die Grundwasserneubildung, da sie ei-

nen erheblichen Teil des Boden- bzw. Sickerwassers und damit auch des neugebildeten Grundwassers oberflächennah auffangen und in die Vorflut ableiten.

Die spezielle geologisch-hydrogeologische Situation (Kap. 6.3.1) und die Bodentypen (Kap. 4) der Gemarkung Schlierbach (Abb. 8-8, CD Anl. 9) haben im Vergleich zu den anderen Gemarkungen (Herchenhain: 6,3% gedrännte Flächen (Abb. 8-5, CD Anl. 9), Ober-Seemen: 8,7% (Abb. 8-6, CD Anl. 9), Burgbracht: 12,8% (Abb. 8-7, CD Anl. 9) zu einem über dem Mittel liegenden Anteil von Dränflächen (21,6%) geführt. Die fruchtbaren Böden auf den unteren flachen Seitenhängen des Brachttales, die sich über den Schichten des Bunt-

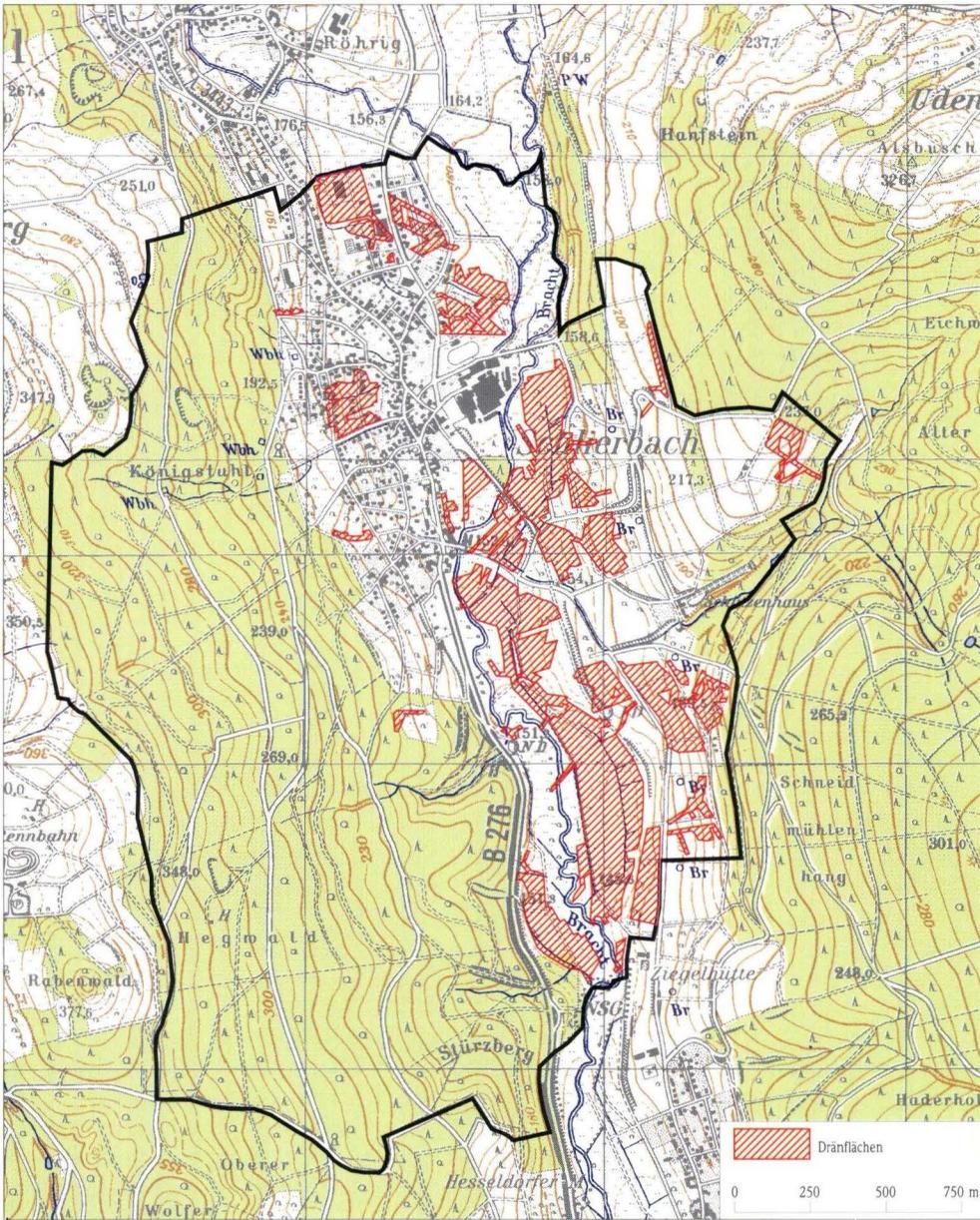


Abb. 8-8. Dränungsübersicht Gemarkung Schlierbach, Stand April 1996.

sandsteins gebildet haben, werden zu 47,2% ackerbaulich genutzt. Diese Flächen sind lediglich zu 4,6%, die Wiesen und Weiden im Auenbereich und an den steilen Oberhängen dagegen zu 31,3% gedrängt. Während die in der Aue zu beobachten-

den oberflächennahen Grundwasserstände überwiegend durch die hydraulische Anbindung an die Vorflut bedingt sind, ist die teilweise starke Ver- nässung im Oberhangbereich auf die Grenze Basalt/Buntsandstein zurückzuführen.

Der Basalt verfügt über die höhere Gebirgsdurchlässigkeit gegenüber den unterlagernden Sandsteinen. Die Wasser erfüllten basaltischen Grundwasserleiter enden über geringer durchlässigen Gesteinen. Es bilden sich Schichtquellen, die die Basaltverbreitungsgrenze nachzeichnen. Durch den Solifluktionsschutt an den Hängen sind zudem häufig Hangschuttquellen zu beobachten, die unterhalb der Basaltverbreitungsgrenze liegen. Die Dränungen fassen dieses Wasser und leiten es in die Bracht ab. In regenreichen Frühjahrsmonaten zeigt sich, dass die Dränungen unterdimensioniert sind. Es kommt zu lokalen Vernässungen, die eine landwirtschaftliche Bearbeitung kurzfristig erschweren oder verhindern. Im Gebiet der Gemarkung Schlierbach trifft dies auf den östlichen Talhang zu.

Im Gegensatz zur Gemarkung Schlierbach (Abb. 8-8, CD Anl. 9) liegen die Gemarkungen Herchenhain (Abb. 8-5 CD Anl. 9), Ober-Seemen (Abb. 8-6, CC Anl. 9) und Burgbracht (Abb. 8-7, CC Anl. 9) ausschließlich im Gebiet des vulkanischen Vogelsberges. Die Flächennutzungen der drei Gemarkungen weisen deutliche Parallelen auf. Der Anteil der forst- bzw. landwirtschaftlich genutzten Fläche liegt mit 88,7% (Herchenhain), 90,0% (Ober-Seemen) und 90,1% (Burgbracht) auf einem ähnlich hohen Niveau. Die überwiegende Grünlandbewirtschaftung der landwirtschaftlich genutzten Flächen zeigt den klimatischen Mittelgebirgscharakter des Vogelsberges auf (Kap. 2.2).

Der Anteil der gedränten Flächen nimmt mit abnehmender Höhenlage der Gemarkungsflächen zu. Während Herchenhain, das noch im Oberwald liegt, über einen Anteil von 6,3% verfügt, steigt der Anteil in Ober-Seemen auf 8,7%. Bei der im vulkanischen Vogelsberg am tiefsten gelegenen Beispielmarmarkung Burgbracht sind 12,8% der gesamten Gemarkungsfläche gedränt.

Die Ergebnisse der Flächennutzungsanalysen der Gemarkungen Herchenhain, Ober-Seemen und Burgbracht ermöglichen eine Überschlagerrechnung auf das Gesamtgebiet des vulkanischen Vogelsberges. Danach ist abzuschätzen, dass etwa 41% (rd. 950 km<sup>2</sup>) forstwirtschaftlich und 43% (rd. 1000 km<sup>2</sup>) landwirtschaftlich genutzt werden. Bei der landwirtschaftlichen Fläche ist mit einem

Anteil von 10% (rd. 100 km<sup>2</sup>) an gedränten Flächen zu rechnen. Das sind etwa 4% des 2300 km<sup>2</sup> großen vulkanischen Vogelsberges. Rd. 9% (ca. 200 km<sup>2</sup>) sind durch Gebäude-, Verkehrs- und Betriebsflächen mehr oder weniger stark versiegelt. Für den Wasserhaushalt resultiert daraus ein Flächenanteil von rd. 13% (rd. 300 km<sup>2</sup>), bei dem eine „gestörte“ Grundwasserneubildung angenommen wird. Im Arbeitsgebiet ist außerhalb des vulkanischen Vogelsberges mit einem höheren Anteil zu rechnen.

Die Flächenversiegelung durch den Bau von Siedlungen, Straßen und Produktionsstätten führt nicht nur zu einer Verminderung der Grundwasserneubildung, sondern auch zu einer Erhöhung des Oberflächenabflusses, da die in diesen Bereichen fallenden Niederschläge ohne wesentliche zeitliche Verzögerung über Rinnsteine, Straßengräben und Kanalleitungen in die Vorflut gelangen. Dies gilt zum Teil auch für gedränte Flächen. Zudem wird das Niederschlagswasser im Bereich von Siedlungen häufig mit Abwasser vermischt und den Kläranlagen zugeführt. Bei großflächigen Abwasserverbänden (z.B. Nidda, Hungen) bedeutet dies eine Abflussminderung im oberhalb der Kläranlage liegenden Einzugsgebiet. Die Gleichbehandlung von Abwasser und Regenwasser kann jedoch auch zu qualitativen Grundwasserproblemen bei Starkregen-, Dauerregen- und Schneeschmelzeereignissen führen, da die Abwasserleitungen und die Kläranlagen das anfallende Wasser zu diesen Zeitpunkten nicht mehr vollständig fassen bzw. aufbereiten. Das Niederschlags-Abwasser-Gemisch gelangt dann über zahlreiche Einleitungs- und Überlaufstellen in die Vorflut, so dass es zur Versickerung von verdünntem Abwasser kommt. Bei Hochwasserereignissen verstärkt sich dieser Vorgang weiträumig. Örtlich wird dies durch hohe Keimzahlen im Grundwasser auennah gelegener Wassergewinnungsanlagen belegt. Die teilweise installierten Ozonierungsanlagen in den überregionalen Wasserwerken des Vogelsberges, wie Inheiden, Rainrod und Kohden, resultieren daraus.

Regionale Wassergewinnungsanlagen verfügen zum überwiegenden Teil über keine Wasseraufbereitungsanlagen. Da eine Verkeimung des Wassers nur schubweise auftritt und eine Beprobung des

Rohwassers nur in größeren zeitlichen Abständen durchgeführt wird, kann das Problem unterschätzt werden. Wie unterschiedlich die hydraulische Situation im vulkanischen Vogelsberg sein kann, zeigen Rohwasseruntersuchungsanalysen. Der Stauseebrunnen Schotten fördert demzufolge Uferfiltratanteile aus der Nidda (Kap. 8.1). Die Nitrat-Konzentrationen des geförderten Wassers schwanken zwischen 2,9 mg/l (01.04.1993) und

55,8 mg/l (22.06.1992). Die niedrige Nitrat-Konzentration lässt vermuten, dass es sich um altes, unbelastetes Wasser handelt. Die zeitweise hohe, über dem Trinkwassergrenzwert liegende Konzentration zeigt einen Einfluss von Oberflächenwasser an. Stark schwankende Nitrat-Konzentrationen lassen sich ebenfalls bei anderen Wassergewinnungsanlagen feststellen (Kap. 9).

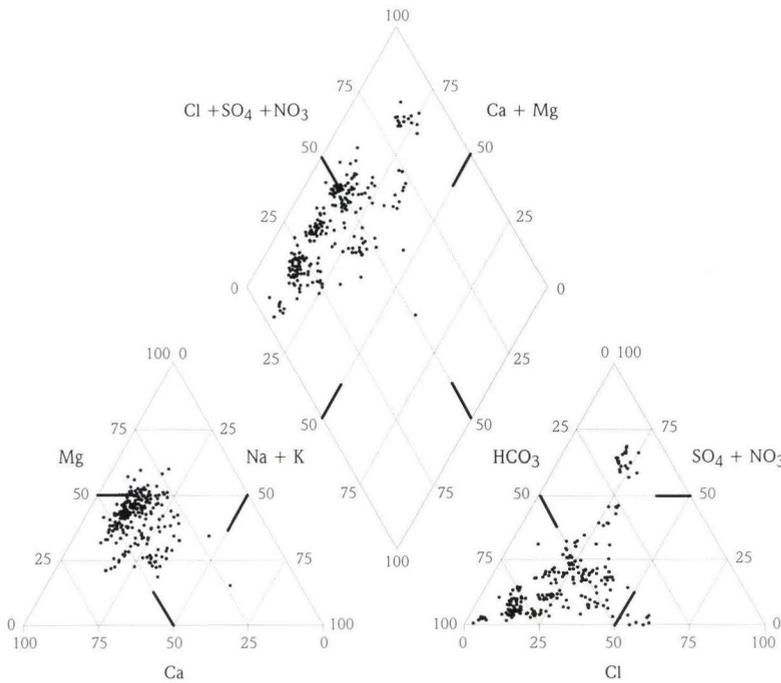
## 9. Grundwasserbeschaffenheit

### 9.1 Grundwassertypisierung

In den Zeiträumen Mai 1995 bis Mai 1996 und März 1998 bis Februar 1999 wurden in zumeist vierwöchigen Abständen 49 Grund- und Quellwässer (530 Analysen) an verschiedenen Messstellen im Arbeitsgebiet hydrochemisch untersucht (CD Anl. 10). Zudem wurden Rohwasseranalysen (Kap. 5.4) von im Arbeitsgebiet liegenden Wassergewinnungsanlagen ausgewertet (Leßmann 2001b).

Die Grundwassertypen des vulkanischen Vogels-

berges stehen in engem Zusammenhang mit dem geologischen und damit dem hydrogeologischen Aufbau der Vogelsberg-Region. Der am häufigsten analysierte Grundwassertyp ist ein leicht basisches, sehr weiches bis hartes **Erdalkali-Hydrogencarbonat-Wasser**, welches zu den meteorischen Wässern gehört. Meteorische Wässer, auch Umsatzwässer, sind jährlich oder in einer Periode weniger Jahre am Wasserkreislauf und dessen Umsatz beteiligt.

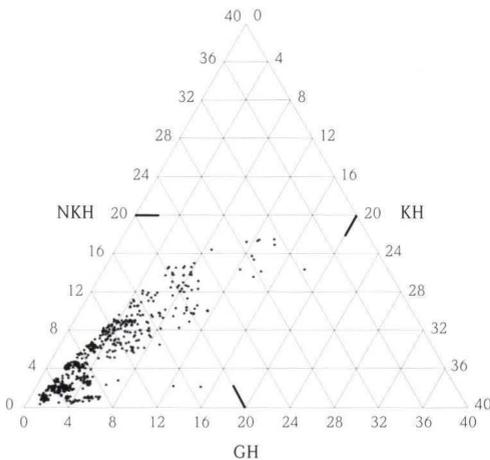


**Abb. 9-1.** Piper-Diagramm von Rohwasseranalysen (1990 – 1994).

Durch Grundwasserabsenkung kann es in Ausnahmefällen zu einer Zirkulation der meteorischen Wässer unter Vorflut-Niveau kommen (Hölting 1992).

Bei den Kationen dieses Grundwassertyps überwiegen die Erdalkalien, wobei der Ca-Anteil zu meist höher als der Mg-Anteil ist. Na und K kommen dagegen untergeordnet vor. Der Na-Anteil liegt dabei höher als der des K. Bei den Anionen dominiert das Hydrogencarbonat mit Anteilen von zumeist über 70 c(eq.)-%. Die Chlorid-, Sulfat- und Nitrat-Konzentrationen sind überwiegend niedrig, teilweise sehr niedrig (Abb. 9-1).

Die starke Variation der Gesamthärte im Arbeitsgebiet hängt von der Position der Brunnen und Quellen im hydrogeologischen Gesamtsystem ab (Abb. 9-2). Hohe Gesamthärten gehen auf den Ein-



**Abb. 9-2.** Dreiecksdiagramm der Wasserhärten [°dH] für Wässer aus der Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke und der Zone der Durchgehenden Grundwassersättigung.

fluss des weit verbreiteten Lösses zurück (Wiegand 1981). Harten Wässern (18–30 °dH) sind zum größten Teil Einzugsgebiete mit Lössbedeckung zuzuordnen. Das Wasser des Br. Bettenhausen, der im westlichen Vogelsberg liegt und eine Gesamthärte von 22 °dH hat, ist hierfür beispielhaft. Hohe Gesamthärten werden jedoch auch durch den Einfluss geogen höher mineralisierter tiefer Grundwässer hervorgerufen, wie dieses bei den Brunnen 99 (25 °dH) und 121 (20 °dH) des Wasserwerkes Orbes der Fall ist.

Sehr weiche Wässer (< 4 °dH) mit einer Gesamthärte zwischen 3,0 °dH und 3,5 °dH sind an die Bereiche der obersten schwebenden Grundwasserstockwerke gebunden, die nicht von Löss bedeckt sind.

Die pH-Werte liegen zum überwiegenden Teil im basischen Bereich zwischen pH 7 und pH 8 (Kap. 9.2). Die Lösungsinhalte der Erdalkali-Hydrogencarbonat-Wässer sind allgemein niedrig. Es kommt zu einer Zunahme der Konzentrationen vom Oberwald (z.B. Niddaquelle: rd. 90 µS/cm) zu den Randbereichen des Arbeitsgebietes (z.B. NQ1: bis 600 µS/cm) (Abb. 9-3). Der Gehalt an freiem Sauerstoff wechselt, reduzierende Verhältnisse kommen nur an einer Messstelle (BuBr 39) vor (Kap. 9.4).

Bei Wassergewinnungsanlagen, die einen hohen Anteil an Vorratswasser fördern, treten pH-Werte über pH 8 auf. Vorratswasser ist von Natur aus nicht oder nur sehr langsam in den periodischen Wasserkreislauf einbezogen und befindet sich weitgehend unter Vorflut-Niveau (Hölting 1992). Die Genese dieser Wässer erklärt sich aus der langen Verweildauer und damit Kontaktzeit mit den vulkanischen Gesteinen des Vogelsberges.

Ionenaustauschvorgängen kommt neben chemischen Reaktionen zwischen den Mineralen der Gesteine und dem Wasser eine wesentliche Bedeutung für die Grundwasserbeschaffenheit zu. Die Ionenaustauschkapazitäten von vulkanischen Gesteinen variieren stark. Carroll (1959, aus Hölting 1996) nennt Austauschkapazitäten für Anionen im Basalt von 0,5–2,8 mmol(eq)/l pro 100 g, in Tuffen von 32–49 mmol(eq)/l pro 100 g und in Zeolithen von 230–620 mmol(eq)/l pro 100 g. Das häufige Vorkommen von Zeolithen in der vulkanischen Abfolge des Vogelsberges führt zu einer allgemein hohen Ionenaustauschkapazität. Der daraus resultierende Grundwassertyp ist ein basisches bis stark basisches **Alkali-Hydrogencarbonat-Wasser**.

Für diesen Grundwassertyp sind die Wasserproben, die aus der Forschungsbohrung Ulrichstein gewonnen wurden, typisch (Tab. 9-1). Die Proben wurden aus Tiefen zwischen 439 und 586 m u. GOK entnommen. Dem Na kommt eine stark dominierende Rolle bei den Alkalien zu. Bei den Erdalkalien überwiegt das Ca gegenüber dem Mg. Die zum Teil extrem hohen pH-Werte bis zu

Tab. 9-1. Alkali-Hydrogenkarbonat-Wasser, Forschungsbohrung Ulrichstein.

Tiefe [m u. GOK]	Entnahme- datum	pH	el. Leitfähigkeit [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	Lösungsinhalt [mg/l]	Redox-Potenzial [mV]	O <sub>2</sub> [mg/l]
439	16.10.1996	9,9	308	251	183	5,3
522	16.10.1996	9,8	307	256	194	5,4
568	16.10.1996	9,6	304	253	187	5,5
586	16.10.1996	9,9	317	241	190	5,5

Tiefe [m u. GOK]	Na <sup>+</sup> [mg/l]	K <sup>+</sup> [mg/l]	Ca <sup>2+</sup> [mg/l]	Mg <sup>2+</sup> [mg/l]	Cl <sup>-</sup> [mg/l]	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [mg/l]	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> [mg/l]	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [mg/l]
439	60,2	0,61	7,49	1,45	31,56	4	11,96	133,5
522	71,1	0,74	6,17	0,83	30,62	4	9,78	132,3
568	67,5	0,21	5,35	0,87	30,89	4	5,43	138,3
586	64,5	0,46	4,64	0,52	30,32	0	5,43	134,7

Tiefe [m u. GOK]	Alkali- Verh.	Erdalkali- Verh.	Erdalkali- Alkali-Verh.	Hydrogenkarbonat- Salinar-Verh.	Salinar- Verh.	Chlorid- Natrium-Verh.
439	167,84	3,13	0,02	1,92	3,57	0,34
522	163,40	4,51	0,03	2,03	4,24	0,28
568	546,64	3,73	0,01	2,30	7,71	0,30
586	238,46	5,41	0,02	2,28	7,56	0,30

pH 10 sind auf die erwähnten Ionenaustauschvorgänge zurückzuführen. Die Alkali-Wässer sind weich bis mittelhart.

Die Förderung von Alkali-Hydrogenkarbonat-Wasser führt zu einem quantitativen Ausgleich von alkalischem mit erdalkalischem Wasser und somit zu einer Durchmischung der Grundwassertypen im direkten Bereich der Grundwasserförderung mit unterschiedlichen Gewichtungen. Bei der Aufnahme

einer langfristigen Grundwasserförderung aus dem Bereich der alkalischen Vorratswässer kommt es zu einem kontinuierlichen Rückgang des Anteils an Vorratswasser gegenüber dem meteorischen Grundwasser (Kap. 9.5) und damit zur Änderung der chemischen Beschaffenheit des gefördertem Grundwassers.

Im Randbereich des Arbeitsgebietes befinden sich zahlreiche Wassergewinnungsanlagen, die

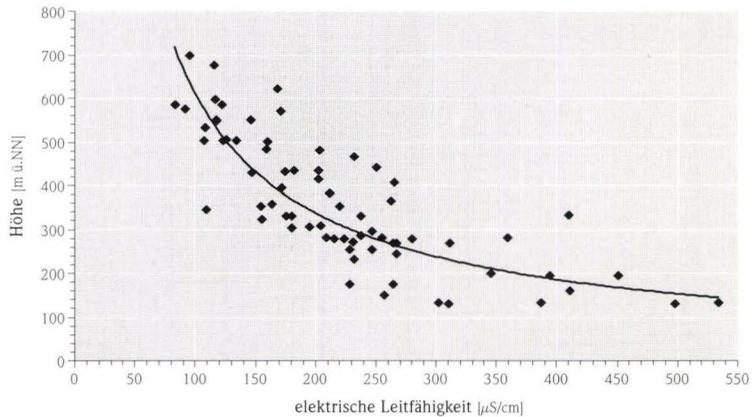


Abb. 9-3. Elektrische Leitfähigkeit.

Grundwasser aus den Schichten des Buntsandsteins fördern. **Buntsandstein-Wässer** haben extrem geringe Lösungsinhalte, geringe Gesamthärten und niedrige pH-Werte. Die pH-Werte können unterhalb von pH 5 liegen, da infolge der geringen  $\text{CaCO}_3$ -Konzentration in der Gesteinsmatrix und damit einhergehender geringer Hydrogencarbonat-Konzentration im Grundwasser die Pufferkapazität des Gesteins nicht ausreicht, um zu einer Neutralisation der sauren Depositionen zu führen. Die Buntsandstein-Wässer sind überwiegend als Erdalkali-Hydrogencarbonat-Wässer ausgebildet; z.T. zeigen sie jedoch auch eine Sulfat-Vormacht (Abb. 9-1). Das dominierende Kation ist Ca. Bei den Alkalien liegt der Na-Anteil über dem K-Anteil. Erhöhte Sulfat-Konzentrationen sind teilweise im Einflussbereich des z.B. bei Gelnhausen aufgeschlossenen Zechsteins zu beobachten. Erhöhte Nitrat-Konzentrationen sind an landwirtschaftliche Nutzungsräume gebunden.

Im SW-Bereich des Arbeitsgebietes gibt es eine Reihe von Quellen und Brunnen, die Mineralwässer schütten bzw. fördern. Entsprechend den „Nauheimer Beschlüssen“ von 1911 werden darunter geogen mineralisierte Grundwässer mit einem Gehalt an gelösten Feststoffen  $\geq 1000$  mg/kg verstanden (Hölting 1996). In Bad Salzhausen tritt **NaCl-Mineralwasser** mit einer Konzentration an festen gelösten Bestandteilen von 10 000 mg/l in Quellen zu Tage. Die Quellwässer finden im Kurbetrieb des Staatsbades Anwendung. Mehrere Autoren (Chelius 1904, Hölting 1981, 1985a, 1985b, Michels 1926, 1966, Scharpff 1972, Steuer 1912) sehen den Ursprung der Wässer in den mächtigen Steinsalzlagerstätten der Zechsteinfolge im Raum Neuhaus-Fulda (Südosthessen). Von dort fließen die Ablaugungswässer entsprechend dem geohydraulischen Potenzialgefälle in schmalen Bahnen entlang der Kinzigtal-Linie nach SW. An der Altstadt-Erbstädter Rotliegendescholle wird ein Teilstrom nach NW abgelenkt und speist die NaCl-Quellen zwischen Gelnhausen und Bad Salzhausen (Hölting 1981, 1985a, 1985b). Scharpff (1972, 1974) gibt eine detaillierte Übersicht über die Mineralwasserausstritte im Wetter-, Horloff-, Nidda- und Niddertal und betrachtet die örtlich nachweisbaren Vorgän-

ge von Verdünnung, Lösung und Ionenaustausch.

Durch die Vermischung des Mineralwassers der allochthonen Ablaugungswässer mit geringer mineralisierten autochthonen Wässern kommt es zu einer Verdünnung, die zu einer Abnahme der Gesamtkonzentration führt. Die Ionenverhältnisse ändern sich entsprechend dem Verdünnungsgrad. Tab. 9-2 vergleicht typische Ionenverhältnisse meteorischer Grundwässer des vulkanischen Vogelsberges mit Mineralwässern aus dem Untersuchungsgebiet und zeigt unterschiedliche Verdünnungsstufen, die im Randbereich des Vulkankomplexes zu finden sind.

Die Ionenverhältnisse der Quelle „Stadtbrunnen“ Ortenberg (Tab. 9-2), die über einen mittleren Lösungsinhalt von rd. 700 mg/l verfügt, zeigen den Einfluss der NaCl-Sole auf. Dies gilt ebenfalls für die Brunnen 99 und 121 des Wasserwerkes Orbes, das im unteren Niddertal liegt. Das geförderte Wasser ist ein Gemisch aus höher konzentriertem NaCl-Wasser und geringer konzentriertem Erdalkali-Hydrogencarbonat-Wasser. Dabei weist beim Wasserwerk Orbes der höhere Lösungsinhalt und die damit verbundene höhere Cl-Konzentration des Br. 99 auf einen höheren Anteil an Mineralwasser hin als dieses beim Br. 121 der Fall ist. Der Ausbau des Br. 99 reicht bis ca. 40 m ü. NN, während der des Br. 121 etwa 15 m darüber endet. Die Rohwasseranalysen, von denen je vier Vollanalysen in den Jahren 1990 bis 1994 durchgeführt wurden, zeigen gering schwankende Cl-Konzentrationen (Br. 99: 147–167 mg Cl/l; Br. 121: 64–69 mg Cl/l). Sie zeichnen jedoch keinen Trend nach, so dass sich keine Versalzung der Wassergewinnungsanlagen andeutet. Es ist wahrscheinlich, dass im Falle einer Erhöhung der Förderrate ein Anstieg der Cl-Konzentration erfolgen wird. Gleichzeitig kann ein Zurückfahren der derzeitigen Förderung (1995: 1,3 Mio.  $\text{m}^3/\text{a}$ ) mit einer Abnahme der Gesamtkonzentration einhergehen.

Im Randbereich des Vogelsberges, besonders im Süd- und West-Vogelsberg, führt die landwirtschaftliche Nutzung der Böden zu erhöhten Nitrat-Konzentrationen im Grundwasser. Dies kann je nach Aufbau des Untergrundes zu Konzentrationen über 25 mg/l im Grundwasser führen. In Ausnahmefällen kann die Nitrat-Belastung über 50 mg/l liegen. Durch das allgemein große Grundwasser-

dargebot kommt es jedoch zumeist zu einer Verdünnung von mit Nitrat belastetem Sickerwasser.

Da die Basalte in den Hanglagen weitflächig von Lösslehm und Verwitterungslehmen sowie in den Tälern von Schwemmlehm überlagert werden,

liegt generell nur eine mittlere Verschmutzungsempfindlichkeit vor. Allgemein kann mit einer hohen Infiltrationsrate von Flusswasser in den Untergrund gerechnet werden, so dass sich hier lokal die Verschmutzungsempfindlichkeit erhöht (Kap. 6.5).

**Tab. 9-2.** Ionenverhältnisse einiger Mineralwässer und Erdalkali-Hydrogencarbonat-Wässer aus dem Arbeitsgebiet.

RUA-Nr.	Bezeichnung	TK 25	Rechtswert	Hochwert	Alkali-Verhältnis	Erdalkali-Verhältnis	Erdalkali-Alkali-Verhältnis
	Bad Salzhausen, Solq. V	5519	349891	558647	59,99	1,19	0,02
0791001	Qu. "Stadtbr." Ortenberg	5620	350393	558023	36,69	1,72	0,63
0197009	Br. 99, Orbes	5619	359941	558356	30,02	1,04	5,45
0197010	Br. 121, Orbes	5619	359906	558295	31,27	1,19	4,75
0863009	Br. Am Fahrerlager	5420	351017	559702	10,20	0,87	8,36
0197005	Br. 17, Inheiden	5519	349392	559178	8,87	0,97	7,56
0197002	Br. 142, Rainrod	5520	350497	559209	10,03	0,99	7,32
0024174	Quellgalerie, Fischborn	5621	352155	558300	7,73	0,80	6,71

RUA-Nr.	Bezeichnung	TK 25	Rechtswert	Hochwert	Hydrogencarb.-Salinar-Verh.	Salinar-Verhältnis	Chlorid-Natrium-Verhältnis
	Bad Salzhausen, Solq. V	5519	349891	558647	0,06	17,25	1,13
0791001	Qu. "Stadtbr." Ortenberg	5620	350393	558023	0,31	11,22	1,15
0197009	Br. 99, Orbes	5619	359941	558356	1,00	5,68	2,76
0197010	Br. 121, Orbes	5619	359906	558295	2,07	2,77	1,37
0863009	Br. Am Fahrerlager	5420	351017	559702	5,38	3,81	1,12
0197005	Br. 17, Inheiden	5519	349392	559178	4,48	1,59	1,02
0197002	Br. 142, Rainrod	5520	350497	559209	4,67	1,26	0,85
0024174	Quellgalerie, Fischborn	5621	352155	558300	8,31	2,75	0,63

## 9.2 Auswirkungen saurer Depositionen auf das Grundwasser

Die pH-Werte der Niederschläge liegen in Deutschland im Jahresmittel bei pH 4,3 (Scheffer & Schachtschabel 1992). Ulrich et al. (1979) fanden heraus, dass in Mitteleuropa die H-Ionen-Zufuhr in Abhängigkeit von der Exposition und dem Bewuchs pro Jahr zwischen 0,8 bis 7 kmol/(ha-a) beträgt. Bei den Säureeinträgen handelt es sich vor allem um Schwefel- und Salpetersäure. Der Bewuchs und die damit verbundene Interzeption ist für die Deposition von entscheidender Bedeutung. Im Solling wurden auf Freiflächen Schwefel-einträge von 23 kg/(ha-a), in einem Buchenbestand von 50 kg/(ha-a) und in einem Fichtenbestand von 85 kg/(ha-a) festgestellt (Ulrich et al. 1979). Balazs (1991) und Brechtel (1992) führten ähnliche Untersuchungen in Hessen zwischen 1984 und 1988 durch. Sie fanden einen Sulfat-

Schwefeleintrag, der im Mittel im Freilandniederschlag bei 17,5 kg/(ha-a), im Kronendurchlass von Buchen bei 22,2 kg/(ha-a) und im Kronendurchlass von Fichten bei 48,1 kg/(ha-a) liegt. Fichten verfügen ganzjährig über einen Nadelbestand und haben daher eine hohe Adsorptionsfähigkeit. In die von Balazs (1991) untersuchten hessischen Fichtenbestände wurden im Mittel der Messjahre 1985/86–1987/88 rd. 3 kmol(eq)/(ha-a) luftbürtige Säuren eingetragen.

Hocke et al. (1996) beschreiben vier Bodenprofile, die in einem Naturwaldreservat östlich von Rudingshain im oberirdischen Einzugsgebiet der Nidda aufgenommen wurden. Das Naturwaldreservat befindet sich in der hydrogeologischen Oberwaldzone. Bei den Profilen handelt es sich um zwei Parabraunerden (1, 2), eine Lockerbraun-

erde (3) und einen Bodentyp, der Charakteristika einer Parabraunerde und einer Lockerbraunerde (4) verbindet. Die Bodenprofile sind jeweils mindestens 90 cm tief (2, 3, 4). Eine Parabraunerde (1) wurde bis zu einer Tiefe von 120 cm untersucht. Die Aufnahmen erfolgten im Dezember der Jahre 1989 (1, 2, 3) und 1995 (4). Die verschiedenen Bodenhorizonte waren sehr stark sauer bis schwach sauer (Tab. 9-3).

**Tab. 9-3.** Einstufung der Böden nach dem pH (CaCl<sub>2</sub>)-Wert, aus Scheffer & Schachtschabel (1992).

Reaktionsbezeichnung	pH-Bereich
extrem alkalisch	> 11,0
sehr stark alkalisch	10,1–11,0
stark alkalisch	9,1–10,0
mäßig alkalisch	8,1– 9,0
schwach alkalisch	7,1– 8,0
neutral	7,0
schwach sauer	6,9– 6,0
mäßig sauer	5,9– 5,0
stark sauer	4,9– 4,0
sehr stark sauer	3,9– 3,0
extrem sauer	< 3,0

Mit zunehmender Sickerstrecke nimmt die Acidität von der Geländeoberfläche zum tieferen Untergrund ab. Die wenige Zentimeter mächtigen organischen Auflagen weisen pH-Werte zwischen 3,8 und 4,4 auf und liegen damit größtenteils im Aluminium-Puffersystem (pH-Bereich: 4,2–3,8). Die A- und B-Horizonte befinden sich überwiegend im Austauscherpufferbereich (pH-Bereich: 5,0–4,2). Nur in den obersten Lagen (3, 4) kann der pH-Wert darunter liegen und gehört somit ebenfalls in den Aluminium-Pufferbereich. In den unteren Bereichen des B-Horizontes und im C-Horizont werden die sauren Sickerwässer durch das silikatische Gestein gepuffert. Eine silikatische Verwitterung findet bei allen pH-Werten statt, jedoch ist die Pufferung nur im Bereich zwischen pH 6,2 und 5,0 gegenüber den anderen Puffersystemen von Bedeutung (Prenzel 1985).

Als ein wesentlicher Faktor für die Entwicklung der Böden und der Grundwasserbeschaffenheit kommt der silikatischen Verwitterung eine entscheidende Bedeutung zu: Die K-Ionen des Gesteins werden an der Oberfläche durch H-Ionen er-

setzt und gehen in Lösung. Dabei steigt mit zunehmendem Verbrauch der H<sup>+</sup>-Ionen der pH-Wert an; die Reaktion ist alkalisch (DVWK 1987, Matthes 1987, Scheffer & Schachtschabel 1992). In humiden Klimazonen werden im Boden durch die Silikatverwitterung zwischen 0,1 und 1,1 kmol(eq)(H<sup>+</sup>)/(ha·a) abgepuffert (Prenzel 1985, Fölster 1985). Die Si-O-M-Gruppen werden protoniert; es entstehen Silanol (Si-OH)-Gruppen unter Freisetzung von Alkali- und Erdalkaliionen (Prenzel 1985, Krieter 1988). Da die Silikate bei der Verwitterung aufgelöst werden ist der Vorgang irreversibel. Es kommt zu einer Degradierung des Bodens, da u.a. die Kationenaustauschkapazität (KAK) herabgesetzt wird und der Boden dadurch weniger Nährstoffe speichern kann. Da die für die Pflanzenentwicklung notwendigen Kationen (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>) ausgewaschen werden, nehmen die Erträge ab (Benecke & Rummenhohl 1992).

In den Zeiträumen Mai 1995 bis Mai 1996 und Februar 1998 bis Februar 1999 wurden in zumeist vierwöchigen Abständen 49 Grund- und Quellwässer (530 Analysen) an verschiedenen Messstellen im Arbeitsgebiet hydrochemisch untersucht. Eine Übersicht über die dabei gemessenen pH-Werte gibt Tab. 9-4. Die pH-Werte der Wasserproben sind zu 68% alkalisch. Bei 29% der Wasserproben lag der pH-Wert unter pH 7,0.

Die niedrigsten Werte wurden mit pH 5,4 im April 1998 an GeQf47 und im August und Oktober 1998 an GrQ32 gemessen. GeQf47 (Jagdhäusquelle im Gettenbachtal) liegt außerhalb des vulkanischen Vogelsberges im Buntsandstein. GrQ32 (Eifa-Quelle) befindet sich am nordöstlichen Rand des Vogelsberges an der Grenze Basalt/Buntsandstein. Die Quellwässer waren überwiegend mäßig sauer (pH 5,4–5,7).

Die Grundwässer mit einem ausschließlich aus vulkanischen Gesteinen bestehenden Einzugsgebiet weisen nur vereinzelt pH-Werte unter 7,0 auf. Ausnahmen bilden die beprobten Wässer der Oberwaldzone, die zum Teil schwach sauer waren. Der Kesselborn (UQf27) wies so z.B. von Mai 1995 bis Januar 1996 pH-Werte zwischen 6,6 und 6,9 auf. Bei sauren Quellwässern unterhalb der Oberwaldzone ist aufgrund der oben beschriebenen Bodenversauerung der Einfluss von Bodenwäs-

**Tab. 9-4.** Übersicht über die pH-Werte des Untersuchungsmessprogrammes.

Gelände- nummer	Anzahl der Probenahmen	pH-Wert			Einstufung
		Minimum	Maximum	schwankt um	
NQ1	10	7,1	7,6	7,4	schwach alkalisch
NQf2	10	6,7	7,1	6,9	schwach alkalisch bis schwach sauer
NQf3	10	7,0	7,4	7,2	schwach alkalisch
NQf4	10	6,6	7,1	6,9	schwach alkalisch bis schwach sauer
NQ5	10	6,6	7,4	6,9	schwach alkalisch bis schwach sauer
NQ6	10	7,3	7,7	7,5	schwach alkalisch
NQf7	10	7,4	7,7	7,6	schwach alkalisch
NQf8	10	7,1	7,2	7,1	schwach alkalisch
NQ9	10	7,3	7,7	7,5	schwach alkalisch
SBr10	10	7,2	7,6	7,4	schwach alkalisch
SQ11	10	6,4	7,2	6,9	schwach sauer bis schwach alkalisch
SBr12	10	7,8	8,3	8,1	schwach bis mäßig alkalisch
SBr13	10	7,2	7,7	7,4	schwach alkalisch
SBr14	10	7,9	8,4	8,2	schwach alkalisch
SQ15	10	7,0	7,9	7,6	schwach alkalisch
SQ16	10	7,5	7,9	7,7	schwach alkalisch
SBr17	23	7,1	7,8	7,4	schwach alkalisch
SQ18	10	6,0	6,9	6,3	schwach sauer
GQ19	23	7,4	8,0	7,6	schwach alkalisch
GQ20	10	7,1	7,7	7,2	schwach alkalisch
GQ21	10	7,1	7,8	7,3	schwach alkalisch
GQ22	10	7,4	7,8	7,7	schwach alkalisch
GQ23	10	6,8	7,8	7,4	schwach alkalisch
GQ24	10	6,9	8,0	7,7	schwach alkalisch bis schwach sauer
GQ25	23	6,3	7,2	6,7	schwach sauer bis schwach alkalisch
GQ26	9	6,7	8,1	7,2	schwach sauer bis schwach alkalisch
UQf27	8	6,6	7,0	6,8	schwach sauer bis schwach alkalisch
UQ28	10	6,5	7,2	6,8	schwach sauer bis schwach alkalisch
UQ29	10	6,7	7,7	7,2	schwach sauer bis schwach alkalisch
UQ30	6	6,3	7,0	6,8	schwach sauer bis schwach alkalisch
AmQ31	13	6,9	7,6	7,1	schwach alkalisch bis schwach sauer
GrQ32	13	5,4	7,0	5,6	mäßig sauer
LtQf33	13	6,8	7,1	7,0	schwach sauer bis schwach alkalisch
GiQ34	13	6,8	7,0	6,9	schwach sauer
LaQf35	13	7,1	7,7	7,4	schwach alkalisch
SBr36	13	6,3	7,2	6,7	schwach sauer bis schwach alkalisch
UQ37	13	6,3	6,6	6,5	schwach sauer
HeQf38	13	5,7	6,1	5,8	mäßig sauer
BuBr39	13	7,8	8,0	7,9	schwach alkalisch
HuBr40	13	7,5	7,7	7,6	schwach alkalisch
GBr41	13	7,5	8,1	7,8	schwach bis mäßig alkalisch
FrQf42	13	6,9	7,5	7,3	schwach alkalisch
FrQf43	13	6,4	7,6	7,1	schwach sauer bis schwach alkalisch
StBr44	13	7,3	7,5	7,4	schwach alkalisch
WeQf45	13	6,6	7,2	6,9	schwach sauer bis schwach alkalisch
WeBr46	13	6,7	7,3	7,1	schwach sauer bis schwach alkalisch
GeQf47	13	5,4	7,0	5,7	mäßig sauer
SdQ48	13	7,0	7,6	7,2	schwach alkalisch

sern oder Hangschuttwässern wahrscheinlich. Diese Quellen schütten somit überwiegend oberflächennahes Grundwasser.

Der höchste pH-Wert lag bei einer Probenahme im Mai 1996 am 150 m tiefen Brunnen Betzenrod 2 (SBr14) bei pH 8,4. Insgesamt kamen an fünf Messstellen (SBr12, SBr14, GQ26, BuBr39, GBr41) pH-Werte über 8,0 vor. Bei der isotopenhydrologischen Probenahme (Kap. 9.5) wurden darüber hinaus bei mehreren tausend Jahre alten Grundwässern pH-Werte bis 9,9 ermittelt.

Die Schwankungsbreite der pH-Werte der längerfristig beprobten Messstellen (mindestens 9 Beprobungen) ist stark unterschiedlich. Sie reicht von 0,1 (NQ8) bis 1,4 (GQ26). Bei den Probenahmestellen mit einer großen Schwankungsbreite handelt es sich um Quellen, deren Schüttungen direkt niederschlagsabhängig sind. Sie gehören der Oberwaldzone oder der Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke an. Niederschläge führen bei diesen Messstellen zu einem Anstieg der Schüttung und zu einer Abnahme des pH-Wertes, da die Kontaktzeit zwischen Wasser und Gestein nicht ausreicht, um zu einem vollständigen chemischen Gleichgewicht zu führen. Der Einfluss von saurem Bodenwasser und Interflow ist dabei wahrscheinlich. Hohe pH-Werte zeigen eine Anbindung der Messstellen an tiefes Grundwasser (Kap. 9.5). Die hohen pH-Werte sind vermutlich auf die alkalische Reaktion der protolytisch und hydrolytisch verwitternden Silikate zurückzuführen. Die Reaktion des dissoziierten Wassers mit den silikatischen Mineralen und die hohe Ionenaustauschkapazität der vulkanischen Abfolge führt zu pH-Werten, die bis an pH 10 heranreichen (z.B. Probe Forschungsbohrung Ulrichstein, Kap. 9.5). Madel (1980) konnte bei seinen Untersuchungen in neun Fällen ebenfalls pH-Werte feststellen, die über pH 9,5 lagen.

Unterhalb von pH 5 wird aufgrund der hohen H-Ionenkonzentrationen Al mobilisiert. Bei einer Al-Konzentration von 10–20 mg/l in der Bodenlösung werden toxische Wirkungen in Waldböden ausgelöst. Landwirtschaftliche Kulturpflanzen zeigen bereits bei einer Konzentration von 0,1–0,5 mg Al/l deutliche Wurzelschäden und Wachstumsminierungen (Scheffer & Schachtschabel 1992). Besonders in der Landwirtschaft wird daher durch

Kalkungen der pH-Wert heraufgesetzt und somit eine Al-Mobilisation verhindert. Für Jungfische gilt ein Toxizitätsschwellenwert von 0,05 mg/l (Dickson 1986). Der Al-Grenzwert für Trinkwasser beträgt 0,2 mg/l (Trinkwasserverordnung 1990).

Die Al-Konzentrationen lagen zumeist unter dem Trinkwassergrenzwert. Erhöhte Al-Konzentrationen bis zu 0,856 mg/l wurden an Grundwässern der Messstelle NQ9 bei zwei Probenahmen im Juli 1995 und April 1996 festgestellt. Es handelt sich um eine Quelle, die in einem Waldgebiet ca. 1500 m nordwestlich der Niddatal Sperre an einem Hang mit der Lokalbezeichnung Kohltag liegt. Sie ist der Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke (Typ 2B) zuzurechnen. Die Quellschüttung schwankte im Beobachtungszeitraum zwischen 0,1 l/s und 0,6 l/s. Bei der Messstelle SQ15 wurde ebenfalls eine über dem Grenzwert für Trinkwasser liegende Al-Konzentration von 0,303 mg/l (Februar 1996) nachgewiesen. SQ15 hat ebenfalls ein forstwirtschaftlich genutztes Einzugsgebiet, das im Bereich nordöstlich von Gonterskirchen liegt. Für beide Quellen ist ein erhöhter Sickerwasserzulauf aus der Bodenzone bzw. aus dem Hangschutt zu vermuten.

Bei der Probenahme von Februar 1998 bis Februar 1999 wurden bei acht weiteren Messstellen (GQ19, LtQf33, GiQ34, SBr36, HeQf38, GBr41, FrQ43, SdQ48) erhöhte Al-Konzentrationen gemessen. Die Einzugsgebiete der Quellen und Brunnen liegen zum größten Teil in Waldgebieten. Die beprobten Buntsandsteinwässer wiesen pH-Werte unter pH 6 auf.

Die in Bodenprofilen (Hocke et al. 1996) und in Quellwässern des vulkanischen Vogelsberges beobachteten pH-Werte zeigen, dass die Depositionen im Arbeitsgebiet zu einer Versauerung des Bodens und damit des Bodenwassers sowie zum Teil des Hangschuttwassers führen. Durch die silikatische Verwitterung kommt es in Abhängigkeit von der Kontaktzeit zu einer Neutralisation und darüber hinaus zu einer Alkalisierung des Grundwassers, die zu extrem basischen Wässern führen kann. Bei stark niederschlagsabhängigen Quellen und Brunnen, die zeitweise hohe Anteile von oberflächennahem Wasser führen, kommen schwach saure Wässer vor. Die lokal erhöhten Al-Konzentrationen

zeigen, dass es örtlich zu einer Al-Mobilisation aufgrund saurer Depositionen kommt. Vereinzelt wurde eine Überschreitung des Trinkwassergrenzwertes festgestellt. Es sind dies Quellen, die oberflä-

chennahes Grundwasser führen und deren Schüttungen stark niederschlagsabhängig sind. Potenziell gefährdete Lagen sind exponierte, niederschlagsreiche Waldstandorte.

### 9.3 Konzentrationen von Cd, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb und Zn

Neben dem Al werden lokal die Trinkwassergrenzwerte (Trinkwasserverordnung 1990) der Schwermetalle Fe (Grenzwert: 0,2 mg/l) und Mn (0,05 mg/l) sowie der Spurenelemente Pb (0,04 mg/l), Cr (0,05 mg/l) und Ni (0,05 mg/l) überschritten. Auffällige Cd- oder Zn-Konzentrationen kommen nicht vor. Während beim Cr (4x) und Ni (1x) trotz ihrer hohen Konzentrationen in der vulkanischen Gesteinsabfolge von im Mittel 399 mg Cr/kg bzw. 249 mg Ni/kg (Rosenberg & Sabel 1996) nur vereinzelte Überschreitungen des Grenzwertes bestehen, wurden beim Pb, das über einen mittleren Anteil in den Gesteinen des Vogelsberges von lediglich 6 mg Pb/kg verfügt, vermehrt erhöhte Konzentrationen im Grundwasser festgestellt (CD Anl. 10).

Die Pb-Konzentrationen unterliegen hierbei z.T. starken Schwankungen. Im Juli und August 1995 lagen sie bei den von Mai 1995 bis Mai 1996 untersuchten Messstellen, mit Ausnahme der Messstelle GQ19 (9,2 mg/l, Juli 1995) unterhalb der methodischen Nachweisgrenze und erreichten damit die niedrigsten Konzentrationen innerhalb dieses Untersuchungszeitraumes. Von September bis Dezember 1995 war dagegen bei fast allen Messstellen eine Überschreitung des Grenzwertes zu beobachten. Die höchste Konzentration wurde bei der Messstelle GQ24 im Oktober 1995 mit 105 mg/l gemessen. Im Dezember 1995 wurde der Trinkwassergrenzwert für Pb in allen Messstellen überschritten.

Während des Probenahmezeitraumes Mai 1998 bis Mai 1999 wurden keine erhöhten Pb-Konzentrationen analysiert.

Cadek et al. (1968) geben Pb-Gehalte von 12 mg/kg in Basalten und 0,3 bis 3,0 mg/l im basaltischen Grundwasser an. Hölting (1982) führte an mehreren Brunnen in Hessen Untersuchungen zu geogenen Spurenstoffkonzentrationen durch. Hierzu gehörte auch der Br. 146 des Wasserwerkes Ge-

uern/Merkenfritz. Nach einer anfänglich leicht erhöhten Konzentration von 21 mg/l im April 1980 wurden nur noch im September 1980 (12 mg/l) eine Pb-Konzentration über der Nachweisgrenze (< 1 mg/l) festgestellt. Madel (1980) fand bei Untersuchungen von Grundwässern in den Gewinnungsgebieten der OVAG bei drei Proben Pb-Konzentrationen, die zwischen 800 mg/l und 5000 mg/l lagen.

Die jetzt durchgeführten Untersuchungen im Vogelsberg ergaben deutlich unter den von Cadek et al. (1968) und Madel (1980) liegende Pb-Konzentrationen. Madel (1980) konnte bei der Auswertung von Wasseranalysen, die über mehrere Jahre gemessen wurden, nur an Proben, die im Herbst genommen wurden, über der Nachweisgrenze liegende Pb-Konzentrationen feststellen. Dies deckt sich mit den eigenen, oben beschriebenen Beobachtungen.

Wie beim Al erhöht sich die Löslichkeit von Pb mit sinkendem pH-Wert. Jedoch sind die erhöhten Al-Konzentrationen nicht mit den erhöhten Pb-Konzentrationen zu korrelieren. Es wird daher nicht von gleichen Wirkungszusammenhängen ausgegangen.

Ein Erklärungsansatz für die teilweise erhöhten Pb-Konzentrationen im Grundwasser wird im atmosphärischen Eintrag von Pb und der Bildung von metallorganischen Komplexen in der Bodenlösung gesehen. Durch emittierte Feinstäube und Aerosole wird das Pb in industrieferne Regionen transportiert. Schultz (1987) stellte für Waldstandorte in Norddeutschland eine Deposition von 130–390 g Pb/(ha·a) fest. Hierbei zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen Fichtenstandorten [Ø 317 g Pb/(ha·a)] und Laubstandorten [Ø 220 g Pb/(ha·a)]. Untersuchungen in wenig besiedelten Regionen Mitteleuropas erbrachten Pb-Einträge zwischen 70–130 g Pb/(ha·a) sowie von weniger als 40 g Pb/(ha·a) in

Skandinavien (DVWK 1988, Schultz 1987).

Balazs (1991) fand in Hessen für den Messzeitraum zwischen 1984 bis 1988 Bleieinträge im Freilandniederschlag von 74 g Pb/(ha-a), im Kronendurchlass von Buchen von 35 g Pb/(ha-a) und im Kronendurchlass von Fichten von 130 g Pb/(ha-a).

Beim Abbau organischer Substanz entstehen durch mikrobielle Stoffwechselfvorgänge und durch Ausscheidungen von Pflanzenwurzeln Fulvo- und Huminsäuren sowie andere niedermolekulare organische Stoffe. Diese bilden mit Metallen teilweise sehr stabile Komplexe. Eine metallorganische Bindung entsteht durch die elektrostatischen Kräfte zwischen positiven Metallionen und negativen funktionellen Gruppen, bei denen es sich um Carboxyl-(-COOH), Carbonyl-(=CO), phenolische Hydroxyl-(Aromat-OH), Methoxyl-(-OCH<sub>3</sub>), Amino-(-NH<sub>2</sub>), Imino-(=NH) und Sulfhydryl-(-SH)-Gruppen handeln kann (Schnitzer & Kahn 1978, Liu et al. 1985). Kovalente Bindungen mit gemeinsamen Bindungsparen zwischen Metall und O- oder N-Atomen sind ebenso möglich wie Übergänge zwischen beiden Bindungsarten. Schwermetalle liegen in der Bodenlösung zum überwiegenden Teil als anionische Chelatkomplexe vor, die eine hohe Stabilität aufweisen. Um pH 7 und darüber sind die meisten Schwermetalle fast ausschließlich als metallorganische Komplexe in der Bodenlösung vorhanden (Scheffer & Schachtschabel 1992).

Für die Vogelsberg-Region läßt sich daraus folgern, dass das atmosphärisch eingetragene Pb im Oberbodenbereich mit seinen extrem niedrigen pH-

Werten durch den verstärkten Abbau organischer Substanz im Spätsommer und Herbst komplexiert wird und so über das Bodenwasser und die Infiltration aus den Vorflutern in das Grundwasser gelangt. Im Winter kommt es aufgrund der niedrigen Temperaturen zu einem Rückgang der mikrobiellen Abbauvorgänge und zu einem geringeren Angebot an organischen Komplexbildnern mit der Folge von fallenden Pb-Konzentrationen in der Bodenlösung. Ab dem Spätsommer kommt es nach diesem Modell durch den verstärkten Abbau organischer Substanz wieder zu steigenden Pb-Konzentrationen.

Das Modell erklärt die erhöhten Pb-Konzentrationen der Probenahme 1995/1996, nicht jedoch, warum solche Konzentrationen bei der Probenahme 1998/1999 nicht mehr auftraten.

Bei den Messstellen NQ5, NQ9 und SQ15 sind ganzjährig über dem Grenzwert (0,2 mg/l) für Trinkwasser liegende Fe-Konzentrationen zu beobachten. SQ16, SQ18, GQ24, UQ28 und UQ30 weisen ebenfalls hohe Konzentrationen an Fe auf. Beim Mn zeigt nur SQ15 auffällig hohe Werte, die ebenfalls zum größten Teil des Jahres über dem Trinkwassergrenzwert (0,05 mg/l) liegen. Hohe Fe- oder Mn-Konzentrationen sind nicht mit einer akuten Gefährdung gleichzusetzen, da eine toxische Wirkung der beiden Schwermetalle nicht bekannt ist. Die niedrigen Grenzwerte dienen dazu, das Trinkwasser vor Geschmacksbeeinträchtigungen und Trübungen zu schützen. Ferner kann es zu Verkrustungen des Rohrleitungsnetzes kommen (Hütter 1992).

## 9.4 Redox-Potenziale und Lösungsinhalte

Die im Gelände gemessenen Redox-Potenziale der Wässer von Brunnen (Br), Quelfassungen (Qf) und Quellen (Q) weisen bis auf die Messstelle BuBr39 positive Redoxspannungen ( $E_h$ ) auf, die zum überwiegenden Teil zwischen 100 und 300 mV liegen. Die Proben gehören größtenteils zu den meteorischen Wässern. Die Wässer des Arbeitsgebiets besitzen oxidierende Eigenschaften. Das Wasser von BuBr39 wies als einzige Messstelle negative Redox-Potenziale zwischen -139 und -10 mV auf; im Mittel der 13 Probenahmen -114 mV.

Die Einordnung der Grundwässer aus dem Vogelsberg in typische  $E_h$ /pH-Verhältnisse natürlicher Wässer ist in Abb. 9-4 dargestellt. Die Wässer befinden sich im oberen Grundwasserbereich und zeigen eine deutliche Tendenz in Richtung der Flusswässer. Im Vergleich zu den  $E_h$ /pH-Verhältnissen von Grundwässern im Diagramm nach Hölting (1996) haben die beprobten Wässer höhere Redox-Potenziale und zum Teil geringere pH-Werte. Die sauren pH-Werte sind im vulkanischen Vogelsberg durch die sauren Depositionen und die geringe

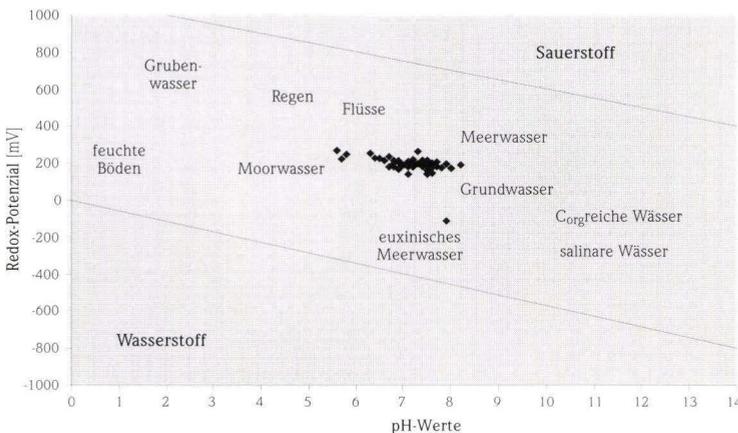
Kontaktzeit des Wassers mit den silikatischen Gesteinen bedingt (Kap. 9.2). Der hohe Anteil von jungen Wässern (< 30 Jahre, Kap. 9.5) und der Einfluss der Infiltration von Flusswasser bei der Grundwasserneubildung spiegelt sich in den für Grundwasser erhöhten Redox-Potenzialen wider. Aufgrund der unterschiedlichen Mischungsverhältnisse der Grundwässer im Vogelsberg aus Bodenwasser, Infiltrat aus Flüssen sowie meteorischen und tiefen Grundwässern lassen die Redox-Potenziale keine Rückschlüsse über die Entstehung und die Zusammensetzung des Wassers aus den unterschiedlichen Komponenten zu. Hinweise hierzu liefern jedoch die Lösungsinhalte der Wässer (Abb. 9-3).

Die Lösungsinhalte steigen mit zunehmender Entfernung von der Oberwaldzone (Abb. 9-3). Mit längerer Kontaktzeit zwischen Wasser und Gestein und größerem durchströmten Gesteinsvolumen steigt der Lösungsinhalt des Wassers an. Die Infiltration von gering mineralisiertem Wasser aus der Vorflut kann zu einer Abnahme der Lösungsinhalte führen. Die elektrischen Leitfähigkeitswerte der Brunnen des Wasserwerkes Kohden (300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) und der Spezialpapierfabrik Ober-Schmitten (256  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) weisen darauf hin, dass Flusswasser der Nidda (250  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) als Filtrat gefördert wird. Der Brunnen Michelnau, der südöstlich von Kohden im Anstrom zum Wasserwerk aus demselben Grundwasserstockwerk (Inheiden/Unteres Niddatal, CD Anl. 2) fördert und außerhalb des Niddatales liegt, wies eine elektrische Leitfähigkeit von ca. 480  $\mu\text{S}/\text{cm}$  auf. Die vorgenannten Brunnen fördern ein Mischwasser aus

höher mineralisiertem Grundwasser und gering mineralisiertem Niddawasserinfiltrat (Kap. 8.1).

Die Zusammensetzung und die Lösungsinhalte der Rohwässer (Abb. 9-1) zeigen Unterschiede zwischen den im vulkanischen Vogelsberg liegenden Wassergewinnungsanlagen und den im Randbereich des Arbeitsgebietes liegenden Brunnen und Quelfassungen, die zum überwiegenden Teil Grundwasser aus den Schichten des Buntsandsteins fördern. Die Buntsandsteinwässer sind zum Teil geringer mineralisiert als die Oberwaldwässer. Der Br. Weilers im unteren Brachtal hatte im März 1992 eine elektrische Leitfähigkeit von lediglich 56  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Mehr als 68  $\mu\text{S}/\text{cm}$  wurden während des Beobachtungszeitraumes nicht erreicht. Die pH-Werte der Buntsandsteinwässer liegen teilweise unter pH 5. Beim Br. Mittbach wurden pH-Werte von 4,4 (April 1994) und beim Br. Dietrichsberg von 4,6 (April 1994) gemessen.

Die Beschaffenheit des geförderten Rohwassers der Buntsandstein-Brunnen weist darauf hin, dass offensichtlich keine bzw. nur eine vernachlässigbar geringe hydraulische Anbindung zwischen den vulkanischen und den triassischen Grundwasserstockwerken besteht. Die Einzugsgebiete der Buntsandstein-Brunnen sind im Bereich des Büdinger-Waldes, also außerhalb des vulkanischen Vogelsberges zu sehen. Selbst die in den Brachtalauen gelegenen Wassergewinnungsanlagen der Südgruppe des Wasserwerkes Neuenschmitten scheinen nur bedingt Infiltrat aus der Bracht zu fördern, sondern erhalten ihr Wasser ausschließlich (Br. I) oder zum Teil (Br. II) aus östlicher Richtung (Abb. 6-21).



**Abb. 9-4.** Redox-Potenziale und pH-Werte der Vogelsbergwässer in einem Diagramm häufig vorkommender  $E_h/pH$ -Bedingungen natürlicher Wässer (verändert nach Hölting 1996).

## 9.5 Isotopenhydrologische Untersuchungen

Isotopenhydrologische Untersuchungen liefern u.a. Informationen über Wasseralter und lassen Rückschlüsse zu Einzugsgebieten und Fließwegen des Grundwassers zu. Bei den im Vogelsberg isotopenhydrologisch beprobten Wässern handelt es sich um die in Kap. 9.1 dargestellten Grundwassertypen bzw. um Mischwässer, die sich in unterschiedlichen Gewichtungen aus den einzelnen Typen zusammensetzen. Mit Ausnahme der Proben GWM 49 (NaCl-Wasser) und Forschungsbohrung Ulrichstein (Alkali-Hydrogencarbonat-Wasser) gehören die Wasserproben zum Erdalkali-Hydrogencarbonat-Typ.

Bei Grundwässern, deren Grundwasserneubildung sich aus Niederschlagswässern verschiedener Jahrgänge zusammensetzt, bietet das Exponentialmodell die Möglichkeit, eine mittlere Verweilzeit (MVZ) aus den  $^3\text{H}$ - und den  $^{14}\text{C}$ -Werten zu berechnen. Die mittlere Verweilzeit ist dabei der gewichtete Mittelwert der „Alters“-Verteilung des Grundwassers (Geyh, in Moser & Rauert 1980).

In Abb. 9-5 und 9-6 deutet sich für die Wässer des Vogelsberges ein ternäres Mischungssystem an. Junges, meteorisches Erdalkali-Hydrogencarbonat-Wasser (bis zu wenigen Jahren alt mit  $^{14}\text{C}$ -Werten über 100 pMC) vermischt sich mit mittelaltem Erdalkali-Hydrogencarbonat-Wasser, das den Vorratswässern zugerechnet wird. Letzteres hat  $^{14}\text{C}$ -Werte zwischen 72 und 80 pMC. Die dritte Komponente ist ein altes Alkali-Hydrogencarbonat-Wasser mit  $^{14}\text{C}$ -Werten unter 50 pMC. Während die mittelalten Erdalkali-Hydrogencarbonat-Wässer ein

Alter bis zu wenigen Jahrzehnten haben, sind die tiefen Alkali-Wässer bis zu mehrere Jahrtausende alt. Die Grundwasserförderung im Bereich des Vorratswassers oder des tiefen Grundwassers führt zur Vermischung mit jungem Wasser. Dies spiegelt sich in der Abnahme der konventionellen  $^{14}\text{C}$ -Alter und der Zunahme der Tritium-Werte wider.

Der initiale  $^{14}\text{C}$ -Wert ( $C_0$ ) für den vulkanischen Vogelsberg beträgt rd. 80 pMC (Abb. 9-5), das entspricht einem Korrekturwert für die konventionellen  $^{14}\text{C}$ -Alter von etwa 2000 Jahren.

$^{14}\text{C}$ -Werten über 100 pMC

Die Niddaquelle und die Quelle am Hundsborn, deren Einzugsgebiete in der Oberwaldzone liegen, haben geringe konventionelle  $^{14}\text{C}$ -Alter und hohe  $^3\text{H}$ -Werte. Das Wasser der Niddaquelle hat mit 20,8 TU den höchsten Tritium-Wert. Er liegt über dem derzeitigen Tritium-Wert der Niederschläge (15 TU). Nach dem Exponentialmodell ergibt sich für das Niddaquellenwasser eine MVZ von rd. 20 Jahren. Das Wasser der Quelle am Hundsborn hat eine MVZ von ca. 5 Jahren. Die Wässer beider Quellen bestehen aus jungem Wasser. Lediglich bei der Niddaquelle besteht die Möglichkeit, dass ein geringer Anteil an älterem Wasser zusitzt.

$^{14}\text{C}$ -Werte zwischen 72 und 80 pMC

Ebenfalls hohe Tritium-Werte haben die Probenstellen Hausbrunnen Lupp (17 TU) und Br. II (14 TU). Der Hausbrunnen der Familie Lupp befind-

**Tab. 9-5.** Isotopenhydrologisch beprobte Brunnen und Grundwassermessstellen (Auswahl).

Bezeichnung	Rechtswert	Hochwert	Probenahme	$\delta^{13}\text{C}$ [‰]	$^{14}\text{C}$ -Alter [Jahre vor 1950]	$^{14}\text{C}$ -Wert [pMC]	$^3\text{H}$ [TU]	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]
Stauseebrunnen	350810	559517	Apr 96	-20,3	2 145 ± 100	76,6 ± 0,9	4,9 ± 1,0	-8,64
Br. 142, OVAG	350467	559210	Apr 96	-20,8	2 495 ± 130	73,3 ± 1,2	8,9 ± 0,7	-8,90
Br. 92, OVAG	350506	559192	Apr 96	-20,4	2 245 ± 100	75,6 ± 1,0	9,8 ± 1,2	-8,69
GWM 41	350138	558825	Apr 96	-20,2	2 015 ± 120	77,8 ± 1,1	< 2,0	-8,57
Br. 89, OVAG	350173	558821	Apr 96	-20,1	2 065 ± 100	77,3 ± 1,0	3,0 ± 0,6	-8,56
Br. 99, OVAG	349941	558356	Apr 96	-16,0	2 345 ± 85	74,7 ± 0,8	8,6 ± 1,1	-8,50
Br. 2, "In der Biege"	351495	558836	Apr 96	-21,6	2 490 ± 130	73,4 ± 1,2	1,6 ± 0,6	-9,01
Br. 146, OVAG	351311	558625	Apr 96	-21,3	2 360 ± 130	74,5 ± 1,2	3,4 ± 1,0	-8,90
Br. 3, OVAG	349397	559170	Apr 96	-19,0	2 205 ± 100	76,0 ± 0,9	2,4 ± 0,6	-8,30
GWM 195	350313	558887	Apr 96	-18,6	1 910 ± 125	78,8 ± 1,2	< 1,9	-8,55

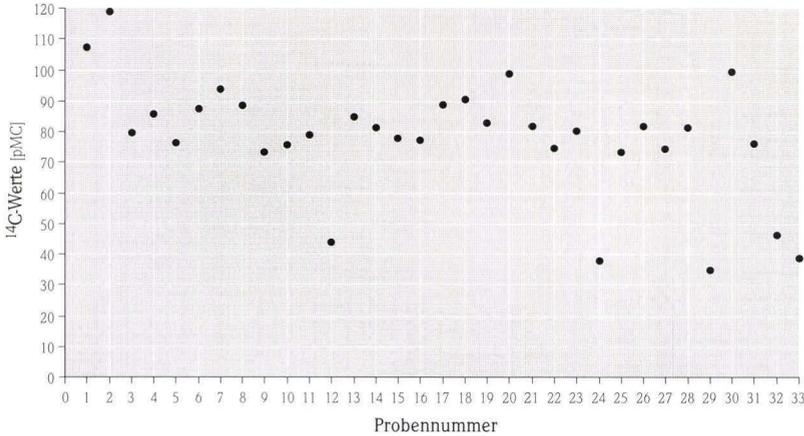


Abb. 9-5.  $^{14}\text{C}$ -Werte.

det sich am nordöstlichen Stadtrand von Nidda. Er ist in den quartären Talsedimenten ausgebaut. Der Brunnen steht in hydraulischer Verbindung mit dem Fluss, da nach Auskunft der Familie der Wasserspiegel des Brunnens unmittelbar mit dem Wasserstand der Nidda schwankt. Die physikochemischen Kenngrößen des Wassers weisen zum Probenahmezeitpunkt auf mit Abwasser kontaminiertes Brunnenwasser hin. Der Standort des Brunnens in einem landwirtschaftlich genutzten Hof, die unzureichende Abdeckung und die teilweise Entwässerung der Hoffläche in den Schachtbrunnen stützen diesen Befund. Die MVZ des Wassers beträgt rd. 20 Jahre.

Der Br. II des Wasserverbandes Kinzig liegt im unteren Brachtal in den Schichten des Buntsandsteins. Wie die Abflussspende (Kap. 8.1 und 8.3) und die hydrochemischen Grundwasseranalysen weisen die isotopehydrologischen Ergebnisse auf eine hydraulische Verbindung des Brunnens zur Bracht hin. Der hohe Tritium-Wert beweist, dass der Br. II einen großen Anteil jungen Wassers fördert. Die MVZ beträgt ca. 15 Jahre.

Der Br. 2 (Gedern) liefert erste Hinweise, dass im vulkanischen Vogelsberg unterhalb einer Höhe von rd. 350 m ü. NN tritiumfreies und damit mittelaltes bis altes Grundwasser vorkommt. Nach dem Expo-

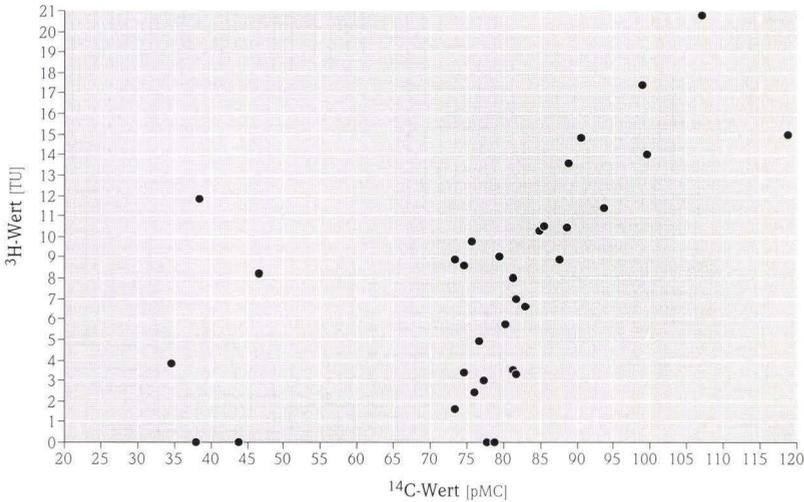


Abb. 9-6.  $^3\text{H}$  -  $^{14}\text{C}$ -Diagramm.

nentialmodell beträgt die MVZ dieser Probe rd. 400 Jahre. Es ist ein Erdalkali-Hydrogencarbonat-Wasser, das dem Vorratswasser zuzuordnen ist. Entweder hat ein Zeitraum von ca. 400 Jahren in den Gesteinen des Vogelsberges nicht ausgereicht, um durch Ionenaustauschvorgänge aus einem Erdalkali-Wasser ein Alkali-Wasser werden zu lassen (Kap. 9.1), oder es handelt sich um ein Regenerationswasser. Dieses entsteht aus einem alkalisierten Wasser, das in ein erdalkalireiches Milieu fließt.

Aus der MVZ von rd. 400 Jahren und einer Grundwasserneubildung, die zum größten Teil in der Oberwaldzone stattfindet, ergibt sich eine Abstandssickerzeit von rd. 20 m/a. Lokal wird es erhebliche Abweichungen von diesem Mittel geben, da das Gestein heterogen aufgebaut ist und die Fließwege des Wassers von der Klüftigkeit der einzelnen Gesteinslagen abhängen.

Der größte Teil der Messstellen des isotopenhydrologischen Untersuchungsprogramms gehört zur Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke. Die beprobten Brunnen (Br. Fahrerlager, Stauseebrunnen, Br. 142, Br. 92, Br. 82, Br. 89, Br. 2 „In der Biege“, Br. 146 und Br. K1) pumpen mittelaltes Wasser, dessen MWZ wenige hundert Jahre beträgt. Durch die Förderung kommt es bei den meisten Brunnen zu einer Vermischung mit jungem Wasser, das sich im Nachweis von Tritium zeigt.

Das Wasser der Messstelle GWM 195, das keinen bzw. einen Tritium-Wert unterhalb der Nachweisgrenze ( $< 1,9$  TU) hat, ist den Vorratswässern zuzuordnen. Nach dem Exponentialmodell liegt die MVZ bei ca. 160 Jahren.

$^{14}\text{C}$ -Werte unter 50 pMC

Nur an fünf von 33 Messstellen wurden  $^{14}\text{C}$ -Werte gefunden, die auf ein mehrere tausend Jahre altes Grundwasser hinweisen. Dieses sind die Grundwassermessstellen 49 und 194, der Br. IX (Neuenschmidten), der Steinbruch Unter-Widdersheim und die aus einer Tiefe von 588 m u. GOK entnommene Wasserprobe aus der Forschungsbohrung Ulrichstein.

Das Wasser der Messstelle GWM 49 gehört mit einem pH-Wert von 9,7 zum NaCl-Typ. Nach den Ionenverhältnissen handelt es sich um ein Misch-

wasser aus NaCl- und Alkali-Hydrogencarbonat-Komponenten (Kap. 9.1).

Die Grundwassermessstelle 194 (OVAG) befindet sich westlich der Ortschaft Harb an der Landstraße L 3138 in Richtung Ulfa. Im September 1995 hatte der Wasserspiegel der Messstelle die gleiche Höhe wie die Grundwasserpotenzialfläche Inheiden/Unteres Niddatal. Die Messstelle ist in der Zone der Durchgehenden Grundwassersättigung verfiltert und befindet sich damit in der untersten hydrogeologischen Zone des vulkanischen Vogelsberges. Bei der Probe handelt es sich um ein Ionenaustauschwasser, das zum Erdalkali-Hydrogencarbonat-Typ gehört. Die für den Vogelsberg erhöhte  $\text{Na}^+$ -Konzentration von 23 mg/l und der pH-Wert von 9,0 deuten auf einen Anteil von Alkali-Hydrogencarbonat-Wasser hin. Über eine Zeitdauer von 5 Stunden wurde aus der Grundwassermessstelle mit einer U-Pumpe Grundwasser entnommen. Der pH-Wert fiel hierbei von über 10 auf 9,0. Es ist anzunehmen, dass in der Messstelle durch das Pumpen Erdalkali-Wasser älterem Alkali-Wasser zugemischt wurde.

Der Br. IX (Neuenschmidten) fördert ebenfalls anteilmäßig Alkali-Wasser. Der 190 m tiefe Brunnen ist in den Schichten des vulkanischen und sedimentären Tertiärs sowie im Oberen und Mittleren Buntsandstein ausgebaut. Die Verfilterung befindet sich zwar im unteren Teil der Bohrung, jedoch zeigt die Beschaffenheit der Proben, dass Grundwasser aus den tertiären Schichten der Vogelsberg-Region gefördert wird.

Die Probenahmestelle im Steinbruch Unter-Widdersheim befindet sich auf der untersten Sohle des Abbaus. Wenn der Wasserstand zu hoch steigt, wird abgepumpt und das Wasser in einen Bach geleitet. Durch diese Wasserhaltung, die einer künstlichen Absenkung des Grundwasserspiegels entspricht, ändert sich der Wassertyp. Erdalkali-Wasser tritt an die Stelle alten Alkali-Wassers.

Beim Mischwasser der Forschungsbohrung Ulrichstein überwiegt der Anteil von Na gegenüber den Erdalkalien. Die Probe war aus dem Bohrloch mit einem Sampler der Arbeitsgruppe Bohrlochgeophysik der GGA, Hannover, aus einer Tiefe von 588 m u. GOK (81 m ü. NN) entnommen worden, nachdem das Bohrloch mehrere Wochen ohne Bearbei-

**Tab. 9-6.** Radiokohlenstoffalter.

Bezeichnung	Rechtswert	Hochwert	Probenahme	$\delta^{13}\text{C}$ [‰]	$^{14}\text{C}$ -Alter [Jahre vor 1950]	$^{14}\text{C}$ -Wert [pMC]	$^3\text{H}$ [TU]	$\delta^{18}\text{O}$ [‰]
GWM 49	350064	558570	Apr 96	-14,1	7 565±190	37,9±0,9	<2,0	-8,78
GWM 194	350004	558907	Apr 96	-17,7	6 615±175	43,9±0,9	<1,9	-8,59
Br. N IX	351936	557732	Apr 96	-17,4	8 500±205	34,7±0,9	3,8±1,0	-9,06
Steinbruch Unter- Widdersheim	349492	558839	Apr 96	-10,9	6 145±105	46,5±0,6	8,2±1,1	-7,94
Forschungsbohrung Ulrichstein	351583	560226	Sep 96	-15,4	7 680±340	38,5±1,8	11,8±1,2	-9,31

tung gestanden hatte. Der pH-Wert der Probe lag bei 9,9. Der hohe Anteil von Tritium (11,8 TU) zeigt, dass es im Bohrloch zu einer Vermischung

von sehr jungem, aber gering mineralisiertem Wasser aus der Oberwaldzone mit altem, tiefem Grundwasser gekommen ist.

## 10. Zusammenfassung

Der vulkanische Vogelsberg ist eines der ergiebigsten Förder- und Reservegebiete für Grundwasser in Hessen. Die vorliegende Arbeit beschreibt das hydrogeologische Gesamtsystem der Vogelsberg-Region. Sie liefert damit einerseits einen Beitrag zur Diskussion über die Hydrogeologie von Vulkankomplexen und schafft andererseits die Grundlage für eine umweltschonende Grundwasserbewirtschaftung des Vogelsberges.

Das Bearbeitungskonzept sah vor, sich von der herkömmlichen, beschränkten Blattschnittkartierung zu lösen und die Flächen der hydrogeologischen Einheit Vogelsberg als Ganzes zu bearbeiten. Die Vorteile dieses Konzeptes bieten u.a. die Möglichkeit, entscheidende, groß angelegte hydrogeologische Strukturen zu erfassen. Eine klein räumigere Bearbeitung kann folglich nur der zweite Schritt einer erschöpfenden Diskussion aller hydrogeologischen Details sein. Quantitative und qualitative Fragestellungen aus dem Fachgebiet der Hydrogeologie und somit auch aus den benachbarten Fachbereichen der Wasserwirtschaft, insbesondere der Ökologie, können nur aus umfassender Kenntnis des Gesamtgebietes heraus beantwortet werden.

Die Bearbeitung erfolgte in drei Teilabschnitten. Der erste umfasst mit einer Fläche von rd. 530 km<sup>2</sup> das Gebiet der L5520 Schotten und galt als Pilotprojekt für die übrige Vogelsberg-Region. Auf

grund der Ergebnisse des ersten Teilabschnittes wurde das Arbeitsgebiet auf die Einzugsgebiete der Großwasserwerke (rd. 1 650 km<sup>2</sup>) erweitert. Danach wurden die Randgebiete des Vogelsberges bearbeitet. Das Gesamtarbeitsgebiet hat damit eine Ausdehnung von rd. 3 300 km<sup>2</sup>. Der vulkanische Vogelsberg hat hierbei einen Anteil von rd. 70 % (rd. 2 300 km<sup>2</sup>).

Bei der hydrogeologischen Kartierung des Arbeitsgebietes wurden insgesamt 3 963 Objekte (im Mittel 1,3 Objekte pro km<sup>2</sup>) aufgenommen. Die Verteilung der Grundwasseraustritte im Arbeitsgebiet und die Auswertung der Abflussspenden und Abflussabgaben zeigen, dass der Vogelsberg in drei hydrogeologische Zonen untergliedert ist: die Oberwaldzone (1), die Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke (2) und die Zone der Durchgehenden Grundwassersättigung (3).

Im Rahmen des Projektes wurden des Weiteren die geologischen und hydrogeologischen Daten von 6 134 Bohrungen (239 459 Bohrmeter) mit einer Mindesttiefe von 10 m bearbeitet. Die Leistungs-Absenkungs-Quotienten (Lq) der an den Bohrungen im Arbeitsgebiet durchgeführten Pumpversuche zeigen die Abhängigkeit der Förderleistungen von der Klüftigkeit des Gesteins. Große Ergiebigkeiten können nicht verallgemeinert werden, sondern sind kleinräumig begrenzt.

Die primär durch den vulkanischen Ausstoß unterschiedlicher Materialien bedingte Wechselfolge von Grundwasser leitenden mit Grundwasser gering leitenden bzw. Grundwasser nicht leitenden Schichten führte zur Ausbildung von mehreren übereinander liegenden Grundwasserstockwerken, die über der Zone der Durchgehenden Grundwasser-sättigung schwebend sind. Das gekernte Bohrprofil der Forschungsbohrung Ulrichstein ließ in Zusammenhang mit einer Kamerabefahrung und geophysikalischen Bohrlochlogs die hydrogeologische Interpretation eines Teils der erbohrten Gesteinsabfolge zu. Über Grundwasser gering leitenden Schichten kann es zur Ausbildung von Grundwasserkörpern kommen. Grundwasser gering leitend können Vulkaniklastika, vertonte Paläoböden, aber auch sehr dichte und kompakte Basalte sein. Starke Klüftigkeiten und damit potenziell gute Wasserwegsamkeiten sind in Topbrekzien von Lavaströmen und in sekundären Umlagerungszonen vorhanden. Eine starke Klüftigkeit des Gesteins muss nicht ein großes Grundwasservorkommen bedeuten.

Gangsysteme sind für die Hydrogeologie des Vogelsberges von stark untergeordneter Bedeutung, da ihr Anteil am Gesteinsvolumen nur wenige Prozent beträgt.

Das räumliche Abflussverhalten der Fließgewässer in der Vogelsberg-Region spiegelt den hydrogeologischen Aufbau und damit die Grundwasserstockwerksgliederung wider. Die Abflüsse geben Aufschluss über die hydraulische Anbindung der Vorflut an die Grundwasserstockwerke.

Die Grundwasserneubildungsspende für das durch Abflussmessungen untersuchte Arbeitsgebiet beträgt im Mittel  $3,7 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$ . Unter Berücksichtigung der rd.  $76 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$  Grundwasser, die z.T. aus dem Gebiet abgeleitet werden, erhöht sie sich auf rd.  $4,5 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$ . Bei einem für das Arbeitsgebiet ermittelten Niederschlag von  $770 \text{ mm/a}$  liegt der Anteil der Grundwasserneubildung am Jahresniederschlag bei 19%. Der mittlere grundwasserbürtige Abfluss hat eine Höhe von rd.  $13 \text{ m}^3/\text{s}$ . Das entspricht einer Grundwasserneubildung von rd.  $410 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$ .

Das unter wasserwirtschaftlichen Gesichtspunkten gewinnbare Grundwasserdargebot wird im Vo-

gelsberg aufgrund von Betriebserfahrungen auf rd. 75% der Grundwasserneubildung beziffert und beträgt damit rd.  $307 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$ . Vom gewinnbaren Grundwasserdargebot werden bei einer Gesamtförderung von rd.  $76 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$  etwa 25% genutzt. Von der mittleren Grundwasserneubildung werden etwa 19% gefördert.

Im Arbeitsgebiet wurden 980 Wassergewinnungsanlagen recherchiert. Etwa 63% dieser Wassergewinnungsanlagen werden nicht mehr genutzt. Der größte Teil hiervon sind Quelfassungen, die durch Bohrbrunnen ersetzt wurden. Von den restlichen 37% dienen ca. 10% einer sporadischen Trinkwassernutzung für Notfälle oder dem Wasserbedarf von Landwirtschaft oder Fischzucht. Rund 33% der Wassergewinnungsanlagen wurden zwischen 1995 und 1997 zur dauerhaften Trinkwasserversorgung genutzt.

669 (68%) Wassergewinnungsanlagen liegen innerhalb der Grenzen des vulkanischen Vogelsberges. Hiervon werden 249 (37%) Wassergewinnungsanlagen genutzt. Bei einer wasserrechtlich zugelassenen Förderrate von rd.  $75 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$  wurden 1995 rd.  $57 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$ , 1996 rd.  $58 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$  und 1997 rd.  $57 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$  gefördert.

321 (32%) Wassergewinnungsanlagen befinden sich außerhalb der Basaltverbreitungsgrenze. 38% (119 WGA) sind in diesem Bereich des Arbeitsgebietes in Betrieb. Die jährlichen Fördermengen lagen zwischen 1995 und 1997 bei  $19\text{--}20 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$ . Die wasserrechtlich zugelassene Förderrate beträgt rd.  $47 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$ .

Aus dem Vogelsberg entnehmen zahlreiche Kommunen direkt oder indirekt über Stadtwerke, Kreiswerke, Wasserversorgungsgruppen, Verbände und kommunal gegründete Gesellschaften Grundwasser zur Trinkwassernutzung. Zwischen 1995 und 1997 wurden von den Kommunen rd.  $69 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$  gefördert. Die für diesen Zeitraum wasserrechtlich zugelassene maximale Entnahmerate lag bei rd.  $110 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$ . Der größte Grundwasserentnehmer aus dem Vogelsberg ist mit rd.  $30 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$  (39%) die Oberhessische Versorgungsbetriebe AG (OVAG). Das mit Abstand größte Wasserwerk im Vogelsberg ist Inheiden mit einer Förderrate von rd.  $18 \text{ Mio. m}^3/\text{a}$ . In Inheiden werden 60% des Grundwassers der OVAG und 32% der Gesamtentnahmen aus

dem vulkanischen Vogelsberg gefördert. Die Wasserwerke mit überregionaler Bedeutung förderten 1995 zusammen 42,4 Mio. m<sup>3</sup>/a und hatten damit einen Anteil von 65% an der Gesamtentnahme. Ohne die Berücksichtigung der Wasserwerke Fischborn und Wirtheim zeigt ein Vergleich der Fördermengen, dass von 1990 bis 1995 die Fördermengen von 50,6 Mio. m<sup>3</sup>/a auf 40,0 Mio. m<sup>3</sup>/a und damit um 21% zurückgegangen sind. Bei der Summe der wasserrechtlichen Bewilligungen bzw. Erlaubnissen ist ebenfalls ein Rückgang um 7% von 65,1 Mio. m<sup>3</sup>/a auf 60,5 Mio. m<sup>3</sup>/a zu verzeichnen.

Das Grundwasser im Arbeitsgebiet ist durch zahlreiche festgesetzte oder in Verfahren befindliche Trinkwasserschutzgebiete und Heilquellenschutzgebiete geschützt. Diese Fläche beträgt rd. 1 750 km<sup>2</sup> und entspricht damit 53% des rd. 3 300 km<sup>2</sup> großen Arbeitsgebietes. Die Heilquellenschutzgebiete (rd. 370 km<sup>2</sup>) überschneiden sich hierbei zum Teil mit den Trinkwasserschutzgebieten (rd. 1 470 km<sup>2</sup>).

Durch den Wechsel der unterschiedlich durchlässigen Gesteinslagen lassen sich die Auswirkungen der Grundwasserentnahme, z.B. der Rückgang der Schüttung oder das Trockenfallen von Grundwasseraustritten, größtenteils auf das Entnahmestockwerk eingrenzen. Dies gilt insbesondere für die Oberwaldzone und die Zone der Schwebenden Grundwasserstockwerke, da hier die meisten Grundwasserstockwerke nicht im hydraulischen Kontakt stehen. Wenn aufgrund besonderer hydraulischer Bedingungen dennoch eine Beeinflussung stattfindet, sind fast ausschließlich nur die direkt an das Entnahmestockwerk angrenzenden Grundwasserstockwerke betroffen.

Die Ergebnisse der durchgeführten Flächennutzungsanalysen der Gemarkungen Herchenhain, Ober-Seemen und Burgbracht ermöglichen eine Überschlagsrechnung auf das Gesamtgebiet des vulkanischen Vogelsberges. Bei der landwirtschaftlichen Fläche ist mit einem Anteil von 10% (rd. 100 km<sup>2</sup>) an gedrähten Flächen zu rechnen. Das sind etwa 4% des Vogelsberges. Rd. 9% (ca. 200 km<sup>2</sup>) können durch Gebäude-, Verkehrs- und Betriebsflächen als mehr oder weniger stark versiegelt angenommen werden. Für den Wasserhaushalt resultiert daraus ein Flächenanteil von rd. 13% (rd.

300 km<sup>2</sup>), bei dem eine „gestörte“ Grundwasserneubildung angenommen wird. Im Arbeitsgebiet ist außerhalb des vulkanischen Vogelsberges mit einem höheren Anteil zu rechnen.

Hydrochemisch betrachtet stehen die Grundwassertypen des vulkanischen Vogelsberges in engem Zusammenhang mit dem geologischen und damit dem hydrogeologischen Aufbau der Vogelsberg-Region. Der am häufigsten analysierte Grundwassertyp ist ein leicht basisches, sehr weiches bis hartes Erdalkali-Hydrogencarbonat-Wasser, welches den meteorischen Wässern zugeordnet wird. Das häufige Vorkommen von Zeolithen in der vulkanischen Abfolge des Vogelsberges führt zu einer allgemein hohen Ionenaustauschkapazität. Der daraus resultierende Grundwassertyp ist ein basisches bis stark basisches Alkali-Hydrogencarbonat-Wasser.

Die in Bodenprofilen und im Grundwasser beobachteten pH-Werte zeigen, dass die atmosphärischen Depositionen im Arbeitsgebiet zur Versauerung des Bodens und des Grundwassers führen. Durch die silikatische Verwitterung kommt es jedoch in Abhängigkeit von der Zeit zur Neutralisation und darüber hinaus zur Alkalisierung des Grundwassers. Bei stark niederschlagsabhängigen Quellen und Brunnen, die zum Teil oberflächennahes Grundwasser aufweisen, können schwach saure Wässer vorkommen. Die vereinzelt festgestellten erhöhten Al-Konzentrationen in Grundwässern des Vogelsberges zeigen, dass es örtlich zu einer Al-Mobilisation aufgrund der sauren Depositionen kommt.

Nach isotopehydrologischen Untersuchungen setzen sich die Wässer des vulkanischen Vogelsberges aus verschiedenen alten Komponenten in unterschiedlichen Mischungen zusammen. Dabei deutet sich ein ternäres Mischungssystem an. „Junges“, meteorisches Erdalkali-Hydrogencarbonat-Wasser (bis zu wenigen Jahren alt) vermischt sich mit „mittelaltem“ Erdalkali-Hydrogencarbonat-Wasser, das den Vorratswässern zugerechnet wird. Die dritte Komponente ist ein „altes“ Alkali-Hydrogencarbonat-Wasser. Das „mittelalte“ Erdalkali-Hydrogencarbonat-Wasser kann ein Alter bis zu wenigen Jahrzehnten haben. Das tiefe Alkali-Wasser hat ein Alter bis zu mehreren Jahrtausenden.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die Hydrogeologie des vulkanischen Vogelsberges im Vergleich mit den Interpretationen und Modellen anderer Autoren zu weltweit vorkommenden Vulkankomplexen (z.B. kanarische oder hawaiianische Inseln) nicht durch gering durchlässige, mehr oder weniger vertikal verlaufende Gangsysteme vorgegeben wird. Vielmehr bildet die vulkanische Abfolge als Wechsellagerung unterschiedlich durchläs-

siger Gesteine einen differenzierten Grundwasserstockwerksbau. Der vulkanische Vogelsberg ist ein mehrschichtiges Kluffgrundwasserleitersystem. Die phänomenologischen Beschreibungen hydrogeologischer Zusammenhänge verschiedener Vulkangebiete lassen vermuten, dass dort zum Teil eine ähnliche Grundwasserstockwerksgliederung wie im Vogelsberg vorhanden ist.

## 11. Schriftenverzeichnis

- Adyalkar, P.G., Srinivasan, K.R. & Mani, V.V.S. (1974): Development and management of the groundwater resources of the Deccan Trapp Areas of Central India. – Simposio Intern. Hidrol. Volcan., Lanzarote; Las Palmas (Congr.-Publ.).
- Ahorner, L. & Schneider, G. (1974): Herdmechanismen von Erdbeben im Oberrheingraben und seinen Randgebieten. – In: H. Illies & K. Fuchs ed.: Approaches to Taphrogenesis: 104–117; Stuttgart.
- Ahorner, L. (1975): Present-day stressfield and seismotectonic block movements along major fault zones in Central Europe. – Tectonophysics, **29**: 233–249; Amsterdam.
- Ahorner, L. (1983): Historical Seismicity and Present-Day Microearthquake Activity of the Rhenish Massif, Central Europe. – In: K. Fuchs, K. von Gehlen, H. Mälzer, H. Murawski & A. Semmel, ed.: Plateau Uplift - The Rhenish Shield - A case history, 198–221; Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo (Springer).
- AHU - Büro für Hydrogeologie und Umwelt GmbH in Zusammenarbeit mit Paulson & Raskin (1993): Übergreifendes Gutachten zur Wassergewinnung im Vogelsberg. Gutachten i.A. des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie und Bundesanliegenheiten; Aachen.
- AHU - Büro für Hydrogeologie und Umwelt GmbH in Zusammenarbeit mit Paulson & Raskin (1995): Umsetzung der umweltschonenden Grundwassergewinnung im Vogelsberg. Leitfaden zur Durchführung der Untersuchungen im Rahmen von Wasserrechtsanträgen. – Gutachten i.A. des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie und Bundesanliegenheiten; Aachen.
- Althaus, H. (1983): Transportverhalten in Grundwasserleitern - Bakterien und Viren. – DVGW-Schriftreihe Wasser, **34**: 137–146; Frankfurt/M.
- Arbeitskreis Grundwasserneubildung (1977): Methoden zur Bestimmung der Grundwasserneubildungsrate. – Arbeitskreis der FH-DGG, Geol. Jb., **C 19**: 3–98; Hannover.
- Bachwinkel, C. (1984): Zum Einfluss der Vulkanite auf die Chemie der Grundwässer im Vogelsberg/Hessen. – Gießener Geologische Schriften, **38**; Gießen.
- Balazs, A. (1991): Niederschlagsdepositionen in Waldgebieten des Landes Hessen - Ergebnisse von Messungen an den Messstationen der „Waldökosystemstudie Hessen“. – HFV-Forschungsbericht, **11**, Hess. Forstl. Versuchsanstalt; Hann. Münden.
- Baumgartner, A. & Liebscher, H.-J. (1996): Allgemeine Hydrologie - quantitative Hydrologie. – In: H.-J. Liebscher, Hrg.: Lehrbuch der Hydrologie, 1, 2. Aufl.: XL + 694 S., 347 Abb., 126 Tab.; Berlin, Stuttgart (Borntraeger).
- Beims, U. (1996): Grundwasserhydrologie. – In: Wassergewinnung und Wasserwirtschaft / Hrg. DVWK, Lehr- und Handbuch Wasserversorgung, **1**: 145–197; München, Wien.
- Benecke, P. & Rummenhohl, H. (1992): Fortschreitende Versauerungsfront in Böden bewaldeter Einzugsgebiete. – DVWK-Nachrichten, **121**: 13–15; Hamburg –Berlin.
- Bistry, T. (1997): Natürlicher und anthropogener Stoffeintrag in das Grundwasser der vulkanischen Ozeaninsel La Palma (Kanarische Inseln). – Berichte, Geol.-Paläont. Inst. Univ. Kiel, Nr. **85**: 172 S.; Kiel.
- Blanckenhorn, M. (1930): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern, Bl. Amöneburg-Homberg a. d. Ohm. – Lfg. **299**: 83 S.; Berlin.
- Boenigk, W., v.d. Brelie, G., Brunacker, K., Kempf, E.K., Koci, A., Schirmer, W., Stadker, G., Streit, R. & Tobien, H. (1977): Jungtertiär und Quartär im Horloff-Graben/Vogelsberg. – Geol.

- Abh. Hessen, **75**: 80 S.; Wiesbaden.
- Brechtel, H.M. & Hoyningen-Huene, J.v. (1979): Einfluss der Verdunstung verschiedener Vegetationsdecken auf den Gebietswasserhaushalt. – Schr. Reihe d. DVWK (= Beitr. Agrarmet., 67; Braunschweig), **40**: 172–223; Braunschweig.
- Brechtel, H.-M. (1992): Belastung der Waldböden durch luftbürtige Schadstoffeinträge in Hessen. – Ökologie-Forum in Hessen, Böden in Hessen: 40–48; Wiesbaden (Hess. Min. für Landentwicklung, Wohnen, Landwirtschaft u. Forsten).
- Brey, G. (1976): CO<sub>2</sub> Solubility and Solubility Mechanismus in Silicate Melts at High Pressures. – Contrib. Mineral. Petrol., **57**: 215–221; Berlin.
- Brinkmann, R. (1968): Gefüge und Vulkanotektonik im Vogelsberg (Niederhessen). – Geol. Rdsch., **57**: 148–165; Stuttgart.
- Brown, R.H., Konoplyantsev, A.A., Ineson, J. & Kovalevsky, V.S. (1975): Groundwater studies. – Studies a. reports in hydrology, **7**; Paris (UNESCO).
- Cadek, J., Malkowsky, M. & Sulcek, Z. (1968): Geochemical significance of subsurface waters for the accumulation of ore components. – XXIII. Intern. Geol. Congress, Sect. Geochemistry, **6**: 161–168; Prag.
- Carroll, D. (1959): Ion exchange in clays and other minerals. – Bull. Geol. Soc. Amer., **70**: 749–780; New York.
- Chelius, C. (1904): Der vulkanische Vogelsberg in seinen Beziehungen zu den Sol- und Heilquellen an seinem Rande. – Balneol. Ztg., wiss.-techn. Tl., **15**: 9–10; Berlin.
- Coello, J. (1987): Las aguas subterráneas en las formaciones del norte de La Palma, Islas Canarias. – Comp. Simp. Intern. Rec. Hidraul., Canarias Agua 2000: 1–19; Tenerife.
- Custodio, E. (1978): Geohidrología de terrenos e islas volcánicas. – Centro de Estudios Hidrográficos, Instituto de Hidrología, Publ., **128**: 303 S.; Madrid.
- Custodio, E. (1985): Low permeability volcanics in the Canary Islands (Spain). – In: I.A.H. [ed.]: Hydrogeology of rocks of low permeability. – Mem. I.A.H., **17**, 1: 562–573; Hannover.
- Custodio, E., Lopez Garcia, L. & Amigo, E. (1988): Simulation par modèle mathématique de l'île volcanique de Ténérife (Canaries, Espagne). – Hydrogéologie, **2**: 153–167; Orléans.
- Custodio, E. (1989): Groundwater characteristics and problems in volcanic rock terrains. – In: IAEA [ed.]: Isotope techniques on the study of the hydrology of fractured and fissured rocks. – Proc.Ser. STI/PUB, **790**: 87–137; Wien (IAEA).
- Davis, S.N. (1974): Changes of porosity and permeability with geological time. – Simp. Intern. Hidrol. Terr. Volcan., Lanzarote, Marzo 1974, Congr. Publ.: **32**; Las Palmas.
- Davis, S.N. & DeWiest, R.J.M. (1967): Hydrogeology. – 2. Aufl., 463 S.; New York (Wiley).
- Diederich, G. (1975): Hydrogeologie. – Erl. geol. Kt. Hessen 1 : 25 000, Bl. 5319 Londorf: 126–147; Wiesbaden.
- Diederich, G. & Wiegand, K. (1978): Hydrogeologie. – Erl. geol. Kt. Hessen 1 : 25 000, Bl. 5620 Ortenberg: 166–182; Wiesbaden.
- Diederich, G. (1986): Hydrogeologie. – Erl. geol. Kt. Hessen 1 : 25 000, Bl. 5320 Burg-Gemünden: 80–96; Wiesbaden.
- Diederich, G., Finkenwirth, A., Hölting, B., Kaufmann, E., Rambow, D., Scharpff, H.-J., Stengel-Rutkowski, W. & Wiegand, K. (1991): Hydrogeologisches Kartennetzwerk Hessen 1 : 300 000. – Geol. Abh. Hessen, **95**: 83 S.; Wiesbaden.
- Dieffenbach, E. (1856): Geologische Specialkarte des Großherzogtums Hessen und der angrenzenden Landesgebiete im Maßstab 1 : 50 000, 2. Section Giessen. – Hrsg. mittelrheinische geologische Verein.; Darmstadt.
- Dickson, W. (1986): Which are the acceptable loadings of atmospheric acids to sensitive waters? – Water Quality Bulletin, **11**: 39–43; Burlington (Ontario).
- DIN 4049, Teil 3 (1994): Hydrologie, Begriffe zur quantitativen Hydrologie. – Deutsches Institut für Normung e.V., Normenausschuß Wasserwesen; Berlin.
- Dreher, S. (1996): Totalfeldmessungen des Erdmagnetfeldes im Vorderen Vogelsberg und ihre Interpretation im Hinblick auf Förderzonen der tertiären Vulkanite und den Schollenbau der Basaltbasis. – Frankfurter geowiss. Arb., Serie A, **14**: 194 S.; Frankfurt am Main.
- DVGW (1983): Entnahme von Wasserproben bei der Wassererschließung. – DVGW-Regelwerk, Merkblatt **W 112**: 11 S.; Bonn.
- DVGW (1995): Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete; 1. Teil: Schutzgebiete für Grundwasser. – DVGW-Regelwerk, Technische Regeln, Arbeitsblatt **W 101**: 23 S.; Eschborn.
- DVWK (1987): Erkundung tiefer Grundwasser-Zirkulationssysteme – Grundlagen und Beispiele. – DVWK-Schriften, **81**: 223 S.; Bonn.
- DVWK (1988): Ergebnisse von neuen Depositionsmessungen in der Bundesrepublik Deutschland und im benachbarten Ausland. – DVWK-Mitteilungen, **14**, XIX: 122 S.; Bonn.
- Ecker, A. (1974): Groundwater circulation in Tenerife, volcanic island (Canary Islands, Spain). – Simp. Intern. Hidrol. Terr. Volcan., Lanzarote, Marzo 1974, Congr. Publ.: **36**; Las Palmas.
- Ecker, A. (1976): Groundwater behaviour in Tenerife, volcanic island (Canary Islands, Spain). – J.

- Hydrol., **28**: 73–86; Amsterdam.
- Ehrenberg, K.-H. (1977): Vulkanische Gesteine. – Erl. geol. Kt. Hessen 1 : 25 000, Bl. Gelnhausen: 70–107; Wiesbaden.
- Ehrenberg, K.-H., Harre, W. & Kreuzer, H. (1977): Datierung nach K/Ar-Methode. – Erl. geol. Kt. Hessen, Bl. Gelnhausen: 107–110; Wiesbaden.
- Ehrenberg, K.-H. (1981): Ergebnisse der petrographischen Untersuchungen und kurzer Vergleich mit Bohrergebnissen aus dem SW-Teil des Unteren Vogelsberges (= 3. Taf.). – Geol. Abh. Hessen, **81**: 120–122; Wiesbaden.
- Ehrenberg, K.-H., Harre, W. & Kreuzer, H. (1981a): K-Ar-Datierungen an den Vulkaniten. – Geol. Abh. Hessen, **81**: 158–162; Wiesbaden.
- Ehrenberg, K.-H., Fromm, K., Harre, W., Hentschel, G., Hölting, B., Holtz, S., Kreuzer, H., Meisl, S., Nöring, F., Plaumann, S., Pucher, R., Strecker, G., Susic, M. & Zschau, H.-J. (1981b): Forschungsbohrungen im Hohen Vogelsberg (Hessen). Bohrung 1 (Flösser-Schneise). Bohrung 2/2A (Hasselborn). – Geol. Abh. Hessen, **81**: 166 S.; Wiesbaden.
- Ehrenberg, K.-H. & Hickethier, H. (1985): Die Basaltbasis im Vogelsberg. Schollenbau und Hinweise zur Entwicklung der vulkanischen Abfolge. – Geol. Jb. Hessen, **113**: 97–135; Wiesbaden.
- Ehrenberg, K.-H. (1986): Vulkanische Bildungen im Vogelsberg. – Fortschr. Mineral., **64** (Beih. 2): 1–34; Stuttgart.
- Ernst, T., Kohler, H., Schütz, D. & Schwab, R. (1970): The Volcanism of the Vogelsberg (Hessen) in the North of the Rhinegraben Rift System. – In: J.-H. Illies & St. Mueller, ed.: Graben Problems, International Upper Mantle Project., Sci. Rep. No. **27**: 143–146; Stuttgart.
- Ernst, T. (1977): Petrographisch ermittelte Altersabfolge der Basaltergüsse von Rainrod I (Vogelsberg) im Gegensatz zur radioaktiven Altersbestimmung. – N. Jb. Mineral., Abh., **129**, 1: 75–99; Stuttgart.
- Fölster, H. (1985): Proton consumption rates in holocene and present-day weathering of acid forest soils. – In: J.I. Drever, ed.: The chemistry of weathering. – Nato ASI Series C, Vol. **149**: 197–209; Dordrecht (Reidel).
- Franciss, F.O. (1970): Contribution à l'étude du mouvement de l'eau à travers les milieux fissurés. – Diss. Fac. Sci. Grenoble; Grenoble.
- Fuhrmann, U. & Lippolt, H.-J. (1987): K-Ar-Datierungen an Maintrapp-Basalten aus Bohrungen in Frankfurt a.M. nach  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Stufenentgasungstechnik. – Geol. Jb. Hessen, **115**: 245–257; Wiesbaden.
- Gerstengrabe, F.-W. & Werner, P.C. (1993): Katalog der Großwetterlagen Europas nach Paul Hess und Helmuth Brezowski, 1881–1992. – 4. Aufl., Berichte des DWD, **113**: 294 S.; Offenbach am Main.
- Geyh, M.A. (1980): Interpretation von Messungen des Tritium und Kohlenstoff-14-Gehalts im Grundwasser. – In: H. Moser & W. Rauer: Isotopenmethoden in der Hydrologie - Lehrbuch der Hydrogeologie, **8**; Berlin-Stuttgart (Borntraeger).
- Gramann, F. (1960): Das ältere Tertiär im nördlichen Vorland des Vogelsberges. – Sber. Ges. Beförd. Ges. Naturw. Marburg, **82**: 6–113; Marburg.
- Gray, D.M. (1970): Handbook on the Principles of Hydrology. – Secretariat Canadian Nat. Com. for the Internat. Hydrological Decade; Ottawa.
- Green, D.H. & Ringwood, A.E. (1967): The genesis of basaltic magmas. – Contr. Mineral. Petrol., **15**: 103–190; Berlin.
- Green, D.H. (1970): A review of experimental evidence on the origin of basaltic and nephelinitic magmas. – Phys. Earth Planet. Interiors, **3**: 221–235; Amsterdam.
- Greiner, G. (1974): In situ stress measurements in southwest Germany. First results. – In: H. Illies & K. Fuchs, ed.: Approaches to Taphrogenesis, 420–432; Stuttgart.
- Hanauer, B. (1982): Hydrogeologie und geohydraulische Untersuchungen im oberen Niddatal (Hessen) unter besonderer Berücksichtigung statistischer Methoden. – Gießener Geologische Schriften, **32**; Gießen.
- Harland, W.B., Armstrong R.L., Cox, A.V., Craig, L.E., Smith, A.G. & Smith, D.G. (1990): A geologic time scale 1989. – 263 S.; Cambridge (Univ. Pr.).
- Harre, W., Kreuzer, H., Müller, P., Pucher, R. & Schricke, W. (1975): Datierung nach K/Ar-Methode und Paläomagnetik. – Erl. geol. Kt. Hessen 1 : 25 000, Bl. 5319 Londorf: 67–73; Wiesbaden.
- Heitfeld, K.H. (1965): Hydro- und baueologische Untersuchungen über die Durchlässigkeit des Untergrundes an Talsperren des Sauerlandes. – Geol. Mitt., **5**: 210 S.; Aachen.
- Hessische Forsteinrichtungsanstalt (Hrsg.) (1992): Waldgesellschaften. – Karte abgeleitet aus der Kartierung hessischer Waldstandorte, 1 : 100 000, TK Grundlage C5518 Gießen; Gießen.
- Hessische Landesanstalt für Umwelt (1997): Trinkwasser- und Heilquellenschutzgebiete in Hessen; Stand 30.11.1996. – Karte 1 : 200 000 mit Begleitbroschüre, 289 S.; Wiesbaden.
- HMILFN, Hessisches Ministerium des Inneren und für Landwirtschaft, Forsten und Naturschutz (1995): Hessische Biotopkartierung (HB). – 3. Fassung, 41 S., 11 Anhänge; Wiesbaden.
- HMUEB, Hessisches Ministerium für

- Umwelt, Energie und Bundesan-  
gelegenheiten (1991): Verwal-  
tungsvorschrift zur Durchfüh-  
rung der Rohwasseruntersuch-  
ungsverordnung -RUV-. –  
Staatsanzeiger des Landes Hes-  
sen vom 19. August 1991; Wies-  
baden.
- HMUEJFG, Hessisches Ministerium  
für Umwelt, Energie, Jugend,  
Familie und Gesundheit (Hrsg.)  
(1996): Die umweltschonende  
Wassergewinnung im Vogels-  
berg. Konzeption und Leitfaden  
zur Umsetzung. – WG 1-1, Gut-  
achten der AHU - Büro für  
Hydrogeologie und Umwelt  
GmbH in Zusammenarbeit mit  
Paulson & Raskin, Kurzfassung,  
65 S.; Wiesbaden.
- Hjartarson, A. (1980): Explanatory  
Notes on the International  
Hydrogeological Map of Europe  
1 : 500 000, Sheet B 2 - Reykja-  
vik.
- Hocke, R., Böger, K., Roeder, E. &  
Schäfer, M. (1996): Niddahän-  
ge östlich Rudingshain - Wald-  
kundliche Untersuchungen. –  
Naturwaldreservate in Hessen.  
5/1; Mitt. Hess. Landesforst-  
verw., **31**: 191 S.; Wiesbaden.
- Hölting, B. & Stengel-Rutkowski, W.  
(1964): Beiträge zur Tektonik  
des nordwestlichen Vorlandes  
des basaltischen Vogelsberges,  
insbesondere des Amöneburger-  
Beckens. – Abh. Hess. L.-Amt  
Bodenforsch., **47**: 37 S.; Wies-  
baden.
- Hölting, B. (1971): Wassererschlie-  
ßung im schwebenden Grund-  
wasserstockwerk (Brunnenboh-  
rung der Gemeinde Stumperten-  
rod/Kr. Alsfeld). – Notizbl. hess.  
L.-Amt Bodenforsch., **99**:  
341–346; Wiesbaden.
- Hölting, B. (1981): Vorkommen und  
Verbreitung von tiefen Grund-  
wässern des  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ -Typs in  
Hessen. – Geol. Jb. Hessen,  
**109**: 139–146; Wiesbaden.
- Hölting, B. (1982): Geogene Konzen-  
trationen von Spurenstoffen,  
insbesondere Schwermetalle, in  
Grundwässern ausgewählter Ge-  
biete Hessens und vergleichende  
Auswertungen mit Grund-  
(Mineral-)Wässern anderer Ge-  
biete. – Geol. Jb. Hessen, **110**:  
137–214; Wiesbaden.
- Hölting, B. (1985a): Gedanken zur  
Geohydraulik von Mineralwäs-  
sern in Hessen. – Geol. Jb. Hes-  
sen, **113**: 145–150; Wiesbaden.
- Hölting, B. (1985b): Karte der Mine-  
ralwasservorkommen in Hessen  
1 : 300 000 mit Erläuterungen.  
– 36 S., Analysen im Anhang;  
Wiesbaden.
- Hölting, B. (1992): Ökologische As-  
pekte der Grundwassergewin-  
nung in der Bundesrepublik  
Deutschland. – gwf, Wasser •  
Abwasser, **133** (12): 609–614;  
München.
- Hölting, B. (1996): Hydrogeologie.  
Einführung in die Allgemeine  
und Angewandte Hydrogeologie.  
– 5. Aufl.: 441 S.; Stuttgart (En-  
ke).
- Hoernle, K., Zhang, Y.-S. & Graham,  
D. (1995): Seismic and geoche-  
mical evidence for large-scale  
mantle upwelling beneath  
eastern Atlantic and western  
and central Europe. – Nature,  
**374**: 34–39; London.
- Hoppe, A. & Schulz, R. (1997): Die  
Forschungsbohrung Vogelsberg  
1996. – Geowissenschaften, **15**:  
172–173; Essen.
- Hoppe, A. & Schulz, R. (Hrsg.)  
(2001): Die Forschungsbohrung  
Vogelsberg 1996 – Einführung  
und Ergebnisse. – Geol. Abh.  
Hessen, **107**: 215 S.; Wiesbaden.
- Hoppe, J. (1995): Zur Hydrogeologie  
der Insel Teneriffa unter beson-  
derer Berücksichtigung der Iso-  
topenhydrogeologie. – Reihe  
Hydrogeologie und Umwelt,  
Univ. Würzburg, **9**: 1–115;  
Würzburg.
- Hoyningen-Huene, J. von (1983):  
Die Interzeption des Nieder-  
schlages in landwirtschaftlichen  
Pflanzenbeständen. – DVWK  
Schr. Reihe **57**: 1–53; Ham-  
burg.
- Hütter, L.A. (1992): Wasser und  
Wasseruntersuchung - Metho-  
dik, Theorie und Praxis chemi-  
scher, chemisch-physikalischer,  
biologischer und bakteriologi-  
scher Untersuchungsverfahren.  
– Laborbücher Chemie, 5. erw.  
u. akt. Aufl.: 515 S.; Frankfurt  
a.M.
- Hummel, K. (1929): Die tektonische  
Entwicklung eines Schollen-  
gebirgslandes (Vogelsberg und  
Rhön). – Fortschr. Geol. Palae-  
ont., **8**, 24: I–VIII + 1–233;  
Berlin.
- Hunt, C.D. Jr. (1996): Geohydrology  
of the island of Oahu, Hawaii. –  
U.S. Geol. Surv., Prof. Pap.  
1412-B: 54 S.; Denver.
- Illies, J.-H. (1974): Intra-Plattentek-  
tonik in Mitteleuropa und der  
Rheingraben. – Oberrhein. geol.  
Abh., **23**, 1/2: 1–24; Karlsruhe.
- Illies, J.-H., Baumann, H. & Hoffers,  
B. (1981): Stress pattern and  
strain release in the Alpine fore-  
land. – Tectonophysics, **71**:  
157–172; Amsterdam.
- Illies, J.-H. (1981): Mechanism of  
graben formation. – Tectonophy-  
sics, **73**: 249–266; Amsterdam.
- Ito, K. & Kennedy, G.C. (1967): Mel-  
ting and phase relations in a na-  
tural peridotite to 40 kilobars. –  
Am. J. Sci., **265**: 519–538; New  
Haven.
- Jaques, A.L. & Green, D.H. (1980):  
Anhydrous melting of peridotite  
at 0–15 kb pressure and the ge-  
nesis of tholeiitic basalts. –  
Contr. Miner. Petrol., **73**:  
287–310; Berlin.
- Jung, S. & Masberg, P. (1998): Ma-  
jor- and trace-element systema-  
tics and isotope geochemistry of  
Cenozoic mafic volcanic rocks  
from the Vogelsberg (central  
Germany) – Constraints on the  
origin of continental alkaline  
and tholeiitic basalts and their  
mantle sources. – J. Volc. Geo-  
therm. Res. **86**: 151–177.
- Kaiser, G. (1976): Hydrogeologische  
Untersuchungen im Nieder-  
schlagsgebiet der Ohm (Hes-

- sen). – Gießener Geologische Schriften, **10**; Gießen.
- Karrenberg, H. (1981): Hydrogeologie der nichtverkarstungsfähigen Festgesteine. – 284 S., Wien–New York (Springer).
- Keller, R. (1961): Gewässer und Wasserhaushalt des Festlandes. – 520 S., 298 Abb., 120 Taf.; Berlin (Haude und Spener).
- Kille, K. (1970): Das Verfahren MoMNO, ein Beitrag zur Berechnung der mittleren langjährigen Grundwasserneubildung mit Hilfe der monatlichen Niedrigwasserabflüsse. – Z. dt. geol. Ges., Sd.-H.-Hydrogeol. u. Hydrogeochemie: 89–95; Hannover.
- Klausing, O. (1988): Die Naturräume Hessens mit einer Karte der naturräumlichen Gliederung 1 : 200 000 - (Neuauf.). – Umweltplanung, Arbeits- und Umweltschutz, **67**: 43 S.; Wiesbaden.
- Klima von Hessen (1981–85): Bearb. Deutscher Wetterdienst Offenbach, M. Kalb u.a. - T. (1). 2: 115 S.; Wiesbaden (Hess. Minister f. Landesentwicklung, Umwelt, Landw. u. Forsten).
- Klüpfel, W. (1930): Zur Geologie des Vogelsberges. Kritische Erörterungen zu K. Hummels Arbeit „Tektonische Entwicklung eines Schollengebirgslandes“. – 50 S.; Gießen.
- Klüpfel, W. (1955): Die Stadien des Tektonisch-Magmatischen Einheitszyklus im westdeutschen Perm und ihre methodische Auswertung zur Analyse eines Gebirges. – Notizbl. hess. L.-Amt f. Bodenforsch., **83**: 131–152; Wiesbaden.
- Knorr, M. (1951): Zur hygienischen Beurteilung der Ergänzung und des Schutzes großer Grundwasservorkommen. – Gas und Wasserfach, Ausg. Wasser. **92** (10): 104–110, 151–155; München.
- Köbrich, C. (1926): Die Tiefbohrung nach Salz in Oberhessen in den Jahren 1905/07. – Notizbl. Ver. Erdkde. u. L.-Anst. Darmstadt, (**V**)**8**: 197–223; Darmstadt.
- König, B. (1997): Erfassung und Bilanzierung von Stoff-Flüssen im Grundwasser der vulkanischen Ozeaninsel La Palma (Kanarische Inseln). – Berichte, Geol.-Paläont. Inst. Univ. Kiel, Nr. **84**: 201 S.; Kiel.
- Kött, A., Ehrenberg, K.-H. & Nesbor, D. (2001): Schichtenverzeichnis der Forschungsbohrung Vogelsberg 1996. – In: A. Hoppe & R. Schulz, Hrsg.: Die Forschungsbohrung Vogelsberg 1996 – Einblicke in einen miozänen Vulkankomplex. – Geol. Abh. Hessen, **107**: 15–47; Wiesbaden.
- Kreuzer, H., Kunz, H., Müller, P. & Schenk, E. (1974): Petrologie und K/Ar-Daten einiger Basalte aus Bohrung 31, Rainrod I (Vogelsberg). – Geol. Jb., **D9**: 76–84; Hannover.
- Krieter, M. (1988): Gefährdung der Trinkwasserversorgung in der Bundesrepublik Deutschland durch „Saure Niederschläge“. – DVGW-Schriftreihe Wasser, **57**: 64 S.; Bonn.
- Krüger, H. (1974): Geologische und hydrogeologische Untersuchungen im Lauterbacher Graben bei Angersbach. – Abh. Hess. L.-Amt Bodenforsch., **70**: 43–50; Wiesbaden.
- Krynine, D.P. & Judd, W.R. (1957): Principles of engineering geology and geotechnics. – 730 S.; New York–Toronto–London (McGraw-Hill).
- Kushiro, I., Syono, Y. & Akimoto, S.I. (1968): Melting of a peridotite nodule at high pressures and high water pressures. – J. Geophys. Res., **73**: 6 023–6 029; Washington.
- Lao, Ch. (1973): Groundwater development in Oahu, Hawaii. – Simposio Intern. Hidrol. Terr. Volcan., Lanzarote; Las Palmas (Congr.-Publ.).
- Leßmann, B. (1995): Bericht zur hydrogeologischen Landesaufnahme der HYK 50, L5520 Schotten (Zentraler Vogelsberg). – Hess. L.-Amt Bodenforsch., Überarb. Fassung Nov. 1995: 30 S.; Wiesbaden.
- Leßmann, B. (1997): Bericht zur Hydrogeologie des Vogelsberges, Stand: Dezember 1997. – Hess. L.-Amt Bodenforsch., Multimedia-CD: 346 S.; Wiesbaden.
- Leßmann, B. & Wiegand, K. (1998): Der vulkanische Vogelsberg als Beispiel für ein mehrschichtiges Grundwasserstockwerkssystem. – Geol. Jb. Hessen, **126**: 81–92, 6 Abb.; Wiesbaden.
- Leßmann, B., Scharpf, H.-J., Wedel, A. & Wiegand, K. (2000): Grundwasser im Vogelsberg. – Broschüre des HMULF und des HLUG, 31 S.; Wiesbaden.
- Leßmann, B. (2001a): Die anthropogene Beeinflussung des grundwasserbürtigen Abflusses und die daraus folgenden Konsequenzen für die Bestimmung der mittleren Grundwasserneubildung durch Abflussmessungen. – Z. angew. Geol., **47**/1: 55–65; Hannover.
- Leßmann, B. (2001b): Hydrochemische und isotopenhydrologische Untersuchungen an den Grundwässern aus dem Vulkangebiet Vogelsberg. – Grundwasser H2, Bd. 6: 81–85; Berlin, Heidelberg, New York (Springer).
- Liu, S.-Y., Fryer, A.J., Minard, R.D. & Bollag, J.-M. (1985): Enzyme-catalyzed complex-formation of amino acid esters and phenolic humus constituents. – Soil Sci. Soc. Am. J. **49**: 337–342; Madison, Wisc.
- Lippolt, H.-J., Todt, W. & Baranyi, I. (1973): Kalium-Argon-Altersbestimmungen zum Spessart- und Vogelsberg-Vulkanismus. – Vortrag geowiss. Tag.; Frankfurt am Main.
- Lippolt, H.-J. (1980): Regionale Geochronologie. – In: T. Kirsten, Hrsg.: Geophysik in Heidelberg. – Sber. Heidelberger Akad. Wiss., math.-nat. Kl., Jg. 1979/1980, Abh. **4**: 28–38; Berlin–Heidelberg–New York.
- Lippolt, H.-J. (1983): Distribution of Volcanic Activity in Space and Ti-

- me. – In: K. Fuchs, K. von Gehlen, H. Mälzer, H. Murawski & A. Semmel, ed.: Plateau Uplift - The Rhenish Shield – A case history, 112–120; Berlin–Heidelberg–New York–Tokyo.
- Lux, K.-N. (1996): Bohrlochgeophysik in Wassergewinnung und Wasserwirtschaft. – In: Wassergewinnung und Wasserwirtschaft/ Hrsg. DVWK, Lehr- und Handbuch Wasserversorgung, **1**: 307–370; München, Wien.
- Madel, W.R.G. (1980): Der Chemismus des Grundwassers im Basaltgrundwasserleiter des Vogelsberges (Hessen) im Gewinnungsgebiet der Oberhessischen Versorgungsbetriebe AG. – Diss. TU Clausthal, 121 S.; Clausthal.
- Maillet, E. (1905): Mécanique et physique du globe. Essais d'hydraulique souterraine et fluviale. – 218 S.; Paris (A. Herrmann).
- Mattheß, G. (1970): Beziehung zwischen geologischem Bau und Grundwasserbewegung in Festgesteinen. – Abh. hess. L.-Amt Bodenforsch., **58**: 105 S.; Wiesbaden.
- Mattheß, G. & Ubell, K. (1983): Lehrbuch der Hydrogeologie, **1**: Allgemeine Hydrogeologie – Grundwasserhaushalt. – 483 S.; Berlin–Stuttgart (Borntraeger).
- Mattheß, G., Isenbeck, M., Pekdeger, A., Schenk, D. & Schröter, J. (1985): Der Stofftransport im Grundwasser und die Wasserschutzgebietesrichtlinie W 101. – Umweltbundesamt Berlin, Statusbericht Bd. 7/85, VI + 181 S.; Berlin.
- Matthes, S. (1987). Mineralogie. – 2. Aufl.: 444 S., 165 Abb., 2 Taf.; Berlin–Heidelberg–New York–Tokyo (Springer).
- Meybeck, M. (1987): Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. – Amer. J. Sci., **287**: 401–428; New Haven, Conn.
- Meyer, W., Albers, H.-J., Berners, H.-P., von Gehlen, K., Glatthaar, D., Löhnertz, W., Pfeffer, K.-H., Schnütgen, A., Wienecke, K. & Zakosek, H. (1983): Pre-Quaternary uplift in the central part of the Rhenish Massif. – In: K. Fuchs, K. von Gehlen, H. Mälzer, H. Murawski & A. Semmel, ed.: Plateau Uplift - The Rhenish Shield - A case history: 39–46; Berlin–Heidelberg–New York–Tokyo (Springer).
- Michels, F. (1926): Der Ursprung der Mineralquellen des Taunus. – Nat. u. Museum, 56. Ber. senckenbg. naturf. Ges., **8**: 225–238; Frankfurt a.M.
- Michels, F. (1966): Die Wiesbadener Mineralquellen. – Jb. nass. Ver. Naturkde., **98**: 17–54; Wiesbaden.
- Moffet, T.B. (1973): Hydrogeology of the Taburiente Caldera, La Palma, Canary Islands, Spain. – 71 S., Graduate Thesis, Univ. Missouri-Columbia; Columbia, Mo.
- Morris, D.A. & Johnson, A.I. (1967): Summary of hydrologic and physical properties of rocks and soil materials as analysed by the Hydrologic Laboratory of the U.S. Geological Survey, 1948–1960. – U.S. geol. Survey Water-Supply Pap. 1839-D: 42 S.; Washington, D.C.
- Moser, H. & Rauert, W. (1980): Isotopenmethoden in der Hydrologie. – Lehrbuch der Hydrogeologie, **8**: 400 S.; Berlin–Stuttgart (Borntraeger).
- Mortier, F., Quang, T.N. & Sadek, M. (1967): Hydrogéologie des formations volcanique du nord-est du Maroc. – Int. Assoc. sci. Hydrol. Publ. **73**: 327–333; Gentbrugge.
- Murawski, H. (1990): Gedanken zu Problemen der Intraplatten-Tektonik Mitteleuropas - Daten und Historie. – N. Jb. Geol. Paläont. Abh., **181**: 1–18; Stuttgart.
- Natermann, E. (1951): Die Linie des langfristigen Grundwassers ( $A_0L$ ) und die Trockenwetter-Abflusslinie (TWL). – Wasserwirtschaft 1951, Tagung in München 1950: 12 ff.; Stuttgart.
- Neugebauer, H.-J. & Tobias, E. (1977): A Study of the Echzell/Wetterau Earthquake of November 4, 1975. – J. Geophys., **43**: 751–760; Berlin–Heidelberg–New York.
- Neugebauer, H.-J. (1981): Zur Entstehung und Entwicklung von kontinentalen Riftsystemen. – Geol. Rdsch., **70**: 231–243; Stuttgart.
- Plass, W. (1978): VII. Böden. – Erl. geol. Kt. Hessen 1 : 25 000, Bl. 5319 Londorf: 104–125; Wiesbaden.
- Prenzel, J. (1985): Verlauf und Ursachen der Bodenversauerung. – Z. dt. geol. Ges., **136**: 293–302; Hannover.
- Prodehl, C. (1981): Structure of the crust and upper mantle beneath the Central European rift system. – Tectonophysics, **80**: 255–269; Amsterdam.
- Reichmann, H. (1978): VIII. Böden. – Erl. geol. Kt. Hessen 1: 25 000, Bl. 5620 Ortenberg: 183–190; Wiesbaden.
- Richter, W. & Lillich, W. (1975): Abriss der Hydrogeologie. – 281 S.; Stuttgart (Enke).
- Riemer, R. (1983): Untersuchungen zum Transportverhalten von Bakterien in sandigen und kiesigen Sedimenten. – Dissertation: 161 S.; Kiel.
- Rosenbaum, U. (1992): Auvergne und Zentralmassiv. – 9. Aufl.: 249 S., DuMont Kunst-Reiseführer; Köln.
- Rosenberg, F. & Sabel, K.-J. (1996): Hintergrundgehalte umweltrelevanter Schwermetalle in Gesteinen und oberflächennahem Untergrund Hessens. – ÜK 300 Schwermetallgehalte Hessen, SMK 300 Hessen; Wiesbaden.
- Rousakis, S. (1979): Hydrogeologie und Wasserhaushalt im Niederschlagsgebiet der Wetter (Hessen). – Gießener Geologische Schriften, **21**; Gießen.
- Sabel, K.-J. (1988): VIII. Böden. – Erl. geol. Kt. Hessen 1 : 25 000,

- Bl. 5621 Wenings: 177–185; Wiesbaden.
- Scharpff, H.-J. (1972): Die Mineralwässer der Wetterau (Hessen). Hydrogeologische und hydrochemische Untersuchungen im Niederschlagsgebiet der Nidda. – Diss.: 265 S.; Frankfurt a. M.
- Scharpff, H.-J. (1974): Verbreitung und Dynamik der mineralwasserbeeinflussten Grundwässer der Wetterau/Hessen. – Abh. hess. L.-Amt Bodenforsch., **70**: 103–158; Wiesbaden.
- Scharpff, H.-J. (1988): Hydrogeologie. – Erl. geol. Kt. Hessen 1 : 25 000, Bl. 5621 Wenings: 116–176; Wiesbaden.
- Scharpff, H.-J. & Quadflieg, A. (1988): Die Hydrogeologie im Umfeld eines Großwasserwerkes am Südrand des Vogelsberges. – Sonderdruck des Kapitels „Hydrogeologie“ der Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1 : 25 000, Bl. 5621 Wenings: 61 S.; Wiesbaden.
- Scheffer, F. & Schachtschabel, P. (1992): Lehrbuch der Bodenkunde. – 13. Aufl.: 491 S.; Stuttgart (Enke).
- Schenk, E. (1957): *Corbiculaschichten* und *Cyrennenmergel* im Horloffgraben (Wetterau). – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., **85**: 224–254, 3 Abb.; Wiesbaden.
- Schenk, E. (1964): Die geologische Erscheinung der Subfusions des Basaltes. – Abh. hess. L.-Amt Bodenforsch., **46**: 31 S.; Wiesbaden.
- Schenk, E. (1968): Über den Wasserhaushalt des basaltischen Paläovulkans Vogelsberg in Hessen. – Steir. Beitr. Hydrogeol., **20**: 23–50; Graz.
- Schenk, E. (1974): Die Fortsetzung des Rheingrabens durch Hessen. – In: Approaches to Taphrogenesis, Inter-Union Commission on Geodynamics, Sci. Rep., **8**: 286–302; Stuttgart.
- Schmidt A. (1992): Die basaltischen Grundwasserleiter im westlichen Vogelsberg (Hessen) und deren Stockwerksgliederung. – Diss. TH Darmstadt, D 17: 178 S.; Darmstadt.
- Schmidt, K. (1978): Erdgeschichte. – Bd. 2 616, 3. Aufl.: 294 S.; Berlin–New York (Sammlung Götschen).
- Schmincke, H.-U. (1982): Vulkane und ihre Wurzeln. – Rhein.-Westf. Akad. Wiss., Vorträge, **N 315**: 35–68; Opladen (Westdeutscher Verlag).
- Schnitzer, M. & Khan, S.U. (ed.) (1978): Soil organic matter. – Dev. soil science, 8: XIII + 319 S.; Amsterdam (Elsevier).
- Schoeller, H. (1962): Les eaux souterraines. – 642 S.; Paris (Masson).
- Schottler, W. (1908): Die Basalte der Umgebung von Gießen. – Abh. Hess. Geol. L.-Anst., **4** (3): 321–491; Darmstadt.
- Schottler, W. (1913): Geologische Karte des Großherzogtums Hessen 1 : 25 000; Bl. Allendorf, Erl., 132 S.; Darmstadt.
- Schottler, W. (1918): Geologische Karte des Großherzogtums Hessen 1 : 25 000; Bl. Laubach, Erl., 107 S.; Darmstadt.
- Schottler, W. (1921): Geologische Karte von Hessen 1 : 25 000; Bl. Hungen, Erl., 132 S.; Darmstadt.
- Schottler, W. (1924): Geologische Karte von Hessen 1 : 25 000; Bl. Nidda und Bl. Schotten, Erl., 132 S.; Darmstadt.
- Schottler, W. (1928): Geologische Karte von Hessen 1 : 25 000; Bl. Herbstein, Erl., 109 S.; Darmstadt.
- Schottler, W. (1931a): Geologische Karte von Hessen 1 : 25 000; Bl. Ulrichstein, Erl., 107 S.; Darmstadt.
- Schottler, W. (1931b): Der Bau des Vogelsberges, erläutert an einem geologischem Querschnitt durch den Vogelsberg und einer Karte der Durchbrüche des Hohen Vogelsberges im Maßstab 1 : 100 000 (Tafel 2). – Notizbl. Hess. Geol. L.-Anst., (V)**13**: 16–61; Darmstadt.
- Schottler, W. (1931c): Die Bedeutung der Spalten für den Aufbau des vulkanischen Vogelsberges und seine Ausgestaltung als Schollengebirge. – N. Jb. Mineral. Geol. Paläont. Abh., Beil.-Band **64**: 739–759, 1 Taf.; Stuttgart.
- Schottler, W. (1937): Der Vogelsberg. – Notizbl. Hess. Geol. L.-Anst., (V) **18**: 3–86; Darmstadt.
- Schottler, W. (1944): Der hessische Wasserschatz und seine Nutzung. – Abh. R.-Amt Bodenforsch., N.F., **209**; Berlin.
- Schrader, L. (1980): VIII. Böden. – Erl. geol. Kt. Hessen, Bl. 5418 Gießen, 2. Aufl.: 105–110; Wiesbaden.
- Schricke, W. (1986): Erläuterungen zur Geologische Karte von Hessen 1 : 25 000, Blatt Nr. 5320 Burg-Gemünden. – 135 S.; Hess. L.-Amt Bodenforsch.; Wiesbaden.
- Schröter, H. (1972): Erfahrungen bei Abflußmessungen in kleinen Vorflutern für hydrogeologische Spezialuntersuchungen. – bbr, **22**: 48–52, 79–82, 9 Abb.; Köln.
- Schultz, R. (1987): Berichte Forschungszentrum Waldökosysteme/Waldsterben, Reihe A, **32**; Göttingen.
- Schutzgemeinschaft Vogelsberg (1997): Ausgetrocknet? Von der Umgestaltung einer Landschaft: Der Vogelsberg und sein Wasser. – Band 1: Laubach. Verf.: R. Hildebrand, C. Hahn, V. Kaiser; 103 S.; Schotten (Schutzgem. Vogelsberg).
- Servicio Hidráulico (1992): Avance del plan hidrológico de La Palma. – Intern. Ber. Servicio Hidráulico de S/C de Tenerife. – 245 S.; S/C de Tenerife.
- Shaw, H.R. (1980): The fracture mechanism of magma transport from the mantle to the surface. – In: R.B. Hargraves, ed.: Physics of magmatic process, 265–323; Princeton (Princeton Univ. Press).

- Singhal, B.B.S. (1974): Groundwater Studies in the Deccan Trapp Formations of India. – Simposio Inter., Hidrol. Terr. Vocan., Lanzarote; Las Palmas (Congr.-Publ.).
- Staudigel, H., Feraud, G. & Giannerini, G. (1986): The history of intrusive activity on the island of La Palma (Canary Islands). – J. Volcanol. Geotherm. Res., **27**: 299–322; Amsterdam.
- Stearns, H.T. & MacDonald, G.A. (1946): Geology and groundwater resources of the Island of Hawaii. – Terr. Hawaii Div. Hydrography Bull. **9**: 363 S.
- Stegemann, W. (1964): Paläontologie und Stratigraphie einiger Sedimentvorkommen im Vogelsberg. – Ber. oberhess. Ges. Natur- und Heilkde. Gießen, naturwiss. Abt., **33**, 4: 251–279; Gießen.
- Steuer, A. (1912): Über die Bildung von Mineral- und Grundwasser in der Wetterau. – J. Gasbeleuchtg. u. verwandte Beleuchtungsarten sowie für Wasserversorgung, **43**: 1054–1057; München.
- Takahshi, E. & Kushiro, I. (1983): Melting of a dry peridotite at high pressure and basalt magma genesis. – Am. Mineral., **68**: 859–879; Menasha.
- Tasche, H. (1859): Geologische Spezialkarte des Großherzogtums Hessen und der angrenzenden Landesgebiete im Maßstab 1 : 50 000, Section Schotten. – Erl., 76 S., Hrsg. mittelrheinische geologische Verein.; Darmstadt.
- Tobien, H. (1963): *Dorcatherium* Kp. und *Heteropox* St. (Artiodactyla, Mamm.) aus der miozänen Kieselgurlagerstätte von Beuern im Vogelsberg (Kr. Gießen). – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., **91**: 7–15; Wiesbaden.
- Trinkwasserverordnung (1990): Verordnung über Trinkwasser für Lebensmittelbetriebe vom 05.12.1990. – BG Bl. 1990, Teil 1, 2 612–2 629.
- Udluft, H. (1957): Hydrogeologische Übersichtskarte 1 : 500 000, Erläuterungen zu Bl. Frankfurt. – Bundesanstalt für Landeskunde; Remagen.
- Ulrich, H.-J. (1967): Zwischenbericht über paläomagnetische Untersuchungen im Vogelsberg. – Nieders. L.-Amt Bodenforsch.; Hannover.
- Ulrich, B., Mayer, R. & Khanna, P.K. (1979): Deposition von Luftverunreinigungen und ihre Auswirkungen in Waldökosystemen im Solling. – Schriften Forstl. Fak. Univ. Göttingen, **58**; Frankfurt (Sauerländer).
- UNESCO SPA-15 (1975): Estudio científico de los recursos de agua en las Islas Canarias (SPA/69/515), Vol. 3: Provincia de Santa Cruz de Tenerife. San Miguel de La Palma : 129–172; Madrid.
- Walter, H. (1974): Hydrogeologie und Wasserhaushalt im oberen Horlofftal (westlicher Vogelsberg). – Abh. hess. L.-Amt Bodenforsch., **69**: 104 S.; Wiesbaden.
- Wasserwirtschaftlicher Rahmenplan Nidda (1968): Einzelpläne zum Großen Hessenplan. 7: 158 S., Hess. Min. Landwirtsch. u. Forsten (Hrsg.); Wiesbaden.
- Wedepohl, K.-H. (1985): Origin of the Tertiary basaltic volcanism in the northern Hessian Depression. – Contrib. Mineral. Petrol., **89**: 122–143; Berlin.
- Wedepohl, K.-H., Gohn, E. & Hartmann, G. (1994): Cenozoic alkali basaltic magmas of western Germany and their products of differentiation. – Contrib. Mineral. Petrol., **115**: 253–278; Berlin.
- Weyl, R. (Hrsg.) (1980): Geologischer Führer Gießen und Umgebung. – 2. Aufl., neubearb.: 193 S.; Gießen.
- Wiegand, K. (1977): Die geologischen, hydrogeologischen und hydrochemischen Verhältnisse des Vogelsberges (Hessen). – Geol. Jb. Hessen, **105**: 177–184; Wiesbaden.
- Wiegand, K. (1981): Grundwasserbeschaffenheit - Süßwässer. – Beitrag in den Erl. geol. Kt. Hessen 1 : 25 000, Bl. 5518 Butzbach, 214 S.; Wiesbaden.
- White, R.S. & McKenzie, D.P. (1989): Magmatism at Rift Zones: The Generation of Volcanic Continental Margins and Flood Basalts. – Journal of Geophysical Research, **94**, Heft B6: 7 685–7 729.
- Wittenbecher, M. (1992): Geochemie tholeiitischer und alkaliolivinbasaltischer Gesteine des Vogelsberges. – Geol. Abh. Hessen, **97**: 52 S.; Wiesbaden.
- WRM (1994): Wasserbilanz Rhein-Main 1990–2010, Fortschreibung 1991 bis 1993. – Arbeitsgemeinschaft Wasserversorgung Rhein-Main, 132 S.; Frankfurt am Main.
- Wunderlich, H.-G. (1974): Die Bedeutung der Süddeutschen Großscholle in der Geodynamik Westeuropas. – Geol. Rdsch., **63**: 755–772; Stuttgart.
- Wundt, W. (1953): Gewässerkunde. – 320 S.; Berlin (Springer).
- Yoder, H.S. & Tilley, C.E. (1962): Origin of basalt magmas: an experimental study of natural and synthetic rock systems. – J. Petrology, **3**: 342–532; Oxford.
- Zimmermann, E. (1910): Schichtenverzeichnisse Bermuthshain I und II - In: Keilhack, K.: Ergebnisse von Bohrungen. – Jb. kgl. geol. L.-Anst. u. Bergakad. (für 1907), **28**: 929; Berlin.

## 12. Anmerkungen zum Inhalt der CD-ROM

Die beigelegte CD enthält die im Text erwähnten Themenkarten (Anlagen 1 bis 10).

Die vorliegenden Geodaten können mit dem Softwareprodukt ArcExplorer (auf dieser CD mitgeliefert) durch Aufruf von „Projektdateien“ visualisiert werden. Diese Dateien enthalten Voreinstellungen bezüglich Auswahl und Darstellung der Geodaten, auf die im Textteil Bezug genommen wird. Der Benutzer hat die Möglichkeit, die Voreinstellungen für seine individuelle Fragestellung zu ändern. So können z.B. bei den einzelnen Darstellungsthemen alle Darstellungselemente gleichzeitig oder nur selektiv in der Karte abgebildet werden und die Karten durch Zoomen in einen beliebigen Maßstab gebracht werden. Die Objekt-spezifischen präzisen Attribut-Informationen, z.B. Höhenlage, Gauss-Krüger-Koordinaten, Quellschüttungen etc., erscheinen in Drop-down-Listen nach Anklicken des Objekt-Sym-

bols auf der Karte. Die Geo-Daten liegen im ArcInfo-Format vor. Die Feldnamen (z.B. EL\_LEITF\_S\_CM) wurden sinnvoll abgekürzt, wobei durch das Produkt ArcExplorer eine max. Länge von 16 Zeichen vorgegeben ist. Unbekannte Objekt-Positionen können durch die ArcExplorer-SQL-Recherche nach Eingabe des Objekt-namens ermittelt werden.

Da die Objektkoordinaten auf Karten im Maßstab 1 : 25 000 bestimmt wurden, auf der CD die Objekte aber vor dem Hintergrund der TK 50 wiedergegeben werden, kann es wegen der abweichenden Topographie beider Kartentypen zu einer scheinbaren abweichenden Lage der betrachteten Objekte kommen.

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Informationsebenen für jedes Projekt (als Anlage bezeichnet) aufgelistet und die Kurzbezeichnung der Attribute erläutert.

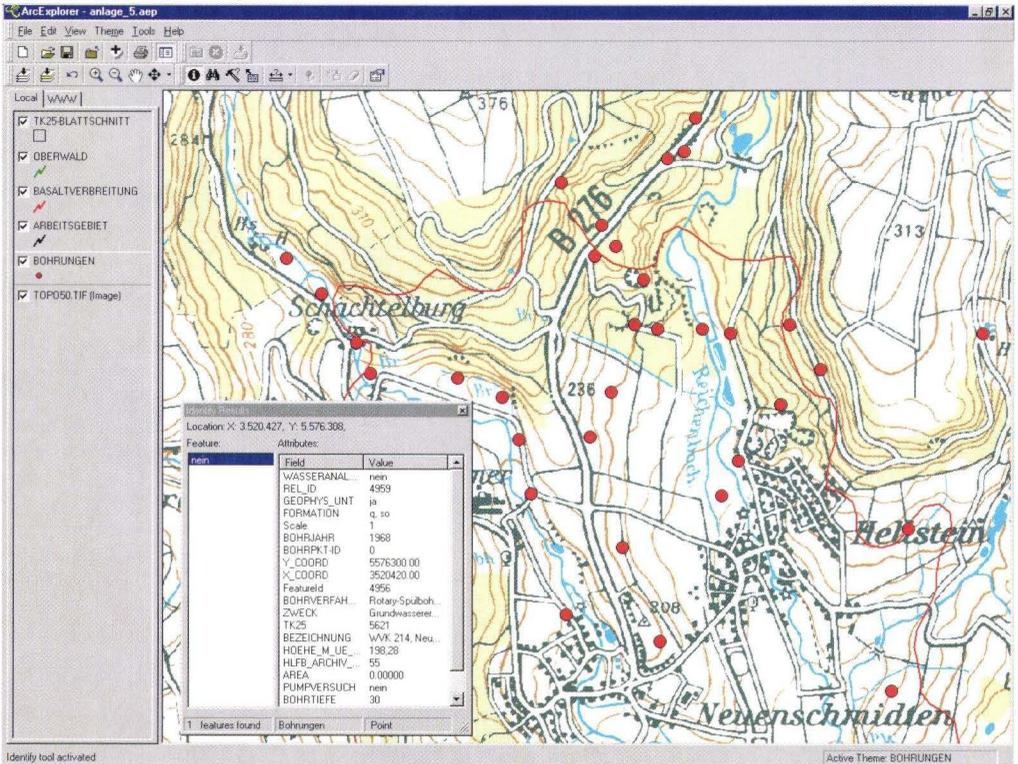


Abb. 12-1. CD-Kartenausschnitt.

Tab. 12-1. Thematische Inhalte der CD-ROM.

Projekt	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Darstellungsthemen (1. Informationsebene)</li> <li>● Darstellungselemente (2. Informationsebene)</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Attribute der Darst.-Elemente</b></p> <p>(3. Informationsebene Drop-down-Liste : Auswahl);</p> <p>Werte jeweils anhängend,</p>	<p style="text-align: center;"><b>Attribut - Erklärung</b> (soweit nicht selbst erklärend)</p>
<p>Auf allen Anlagen (ein-/ausblendbar) ⇒</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Topo(grafie) der TK 50</li> <li>● TK 25-Blattschnitt mit Blatt-Nummer</li> <li>● Oberwald Umrandungslinie; nicht auf Anl. 3, 4, 7, 8, 9)</li> <li>● Arbeitsgebiet (Umrandungslinie; nicht auf Anl.. 4, 7, 8, 9)</li> <li>● Basaltverbreitung (Umrandungslinie; nicht auf Anl.. 9)</li> </ul>		
<p>Anlage 1</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Grundwasseraustritte                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Drän</li> <li>• Nassstelle</li> <li>• Quelle</li> <li>• Quellgruppe</li> <li>• Schwinde</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ABFL_SCHAETZ_L_S</li> <li>- ABFLUSSGRUPPE</li> <li>- AUFNAHMEDATUM</li> <li>- BEMERKUNG</li> <li>- GELAENDENUMMER</li> <li>- GW_ART</li> <li>- GWPKT-ID</li> <li>- KATASTERNUMMER</li> <li>- TEMPERATUR_C</li> <li>- TK25_NAME</li> <li>- TK25_NUMMER</li> <li>- X_COORD</li> <li>- Y_COORD</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geschätzter Abflusswert am Tag der Beobachtung</li> <li>- Klasse des Abflusswertes (von - bis l/s)</li> <li>- Datum der Objektkartierung</li> <li>- Bemerkung</li> <li>- Kartier-Arbeitsnummer des Objektes</li> <li>- Art des Grundwasserobjektes (s. Elemente)</li> <li>- Archivierungs/Kataster-Nr. des Objektes</li> <li>- Wassertemperatur am Kartiertag</li> <li>- Name der TK 25</li> <li>- Nummer der TK 25</li> <li>- Gauss-Krüger-Gitterwert: Rechts</li> <li>- Gauss-Krüger-Gitterwert: Hoch</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Flächige Grundwasseraustritte</li> </ul>	<p>wie bei Grundwasseraustritte</p>	
<p>Anlage 2</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Grundwassergleichen                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Grundwasserpotenzialflächen</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fauerbach</li> <li>- Fischborn/Gedern</li> <li>- Fischborn/Kirchbracht</li> <li>- Gedern</li> <li>- Gedern/Merkenfritz I</li> <li>- Gedern/Merkenfritz II</li> <li>- Gedern/Merkenfritz III</li> <li>- Gettenbach I</li> <li>- Gettenbach II</li> <li>- Gettenbach III</li> <li>- Hungen-Oberschmitten</li> <li>- Inheiden/Unteres Niddatal</li> <li>- Lauter/Grünberg</li> <li>- Lauter/Queckborn</li> <li>- Mücke-Merlau</li> <li>- Neuenschmidten I</li> <li>- Neuenschmidten II</li> <li>- Ober-Wieseck</li> <li>- Ober-Ohmen/Groß-Felda</li> <li>- Rainrod</li> <li>- Rainrod/Eichelsdorf</li> <li>- Ruppertsburg/Ober-Schmitten</li> <li>- Salz/Kirchbracht</li> <li>- Schotten I</li> <li>- Schotten II</li> <li>- Schotten III</li> <li>- Sonstige</li> </ul>	<p>Selektierte Darstellung der einzelnen Potenzialflächen und/oder Grundwasserhöhenlinien möglich</p>

		– Unterer Riedbach – Wetterfeld	
Anlage 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>Wasserschutzgebiete</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Trinkwasserschutzgebiete, jeweils nach Zonen I, II, III</b></li> </ul> </li> </ul>	– WSGNR – ZONE – ZONE_NAME	– Wasserschutzgebietsnummer (HLfU 1997) – Zonen-Zugehörigkeit der markierten Teilfläche – Zonenbezeichnung
	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>Heilquellenschutzgebiete</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Heilquellenschutzgebiete, jeweils nach Zonen I, II, III, IV</b></li> </ul> </li> </ul>	Wie bei Trinkwasserschutzgebiete	
Anlage 4	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>Einzugsgebiete</b></li> </ul>	– Oberirdische Teileinzugsgebiete – Abflusssysteme – Hauptwasserscheiden	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>Abflusspenden (90er Jahre)</b></li> </ul>	– 21 Abflusskategorien	Staffelung der Abflusskategorien nach Liter/sec*km² (s. Kap 8.1)
Anlage 5	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>Bohrungen</b></li> </ul>	– BEZEICHNUNG – BOHRJAHR – BOHRVERFAHREN – FORMATION – GEOPHYS_UNT  – HLFB_ARCHIV – HOEHE_M_UE_NN – BOHRTIEFE – PUMPTVERSUCH – TK25 – WASSERANALYSE – X_COORD – Y_COORD – ZWECK	– Name, Bezeichnung – Jahr der Bohrungs-Niederbringung – Art des Bohrverfahrens – Geologische Formation, Kurzinformation – Geophysikalische Untersuchung liegt vor: ja/nein – Lfd. Nr. des HLFB/HLUG-Archivs – Meereshöhe des Ansatzpunktes in m – Bohrtiefe – Pumversuchsergebnis liegt vor: ja/nein – Nummer der TK 25 – Wasseranalyse liegt vor: ja/nein – Gauss-Krüger Gitterwert: Rechts – Gauss-Krüger-Gitterwert: Hoch – Zweck der Bohrung
Anlage 6	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>Trockenfallstrecken</b> (+ Inhalte der Zeile 1)</li> </ul>	– LENGTH	– Länge der betrachteten Teilabschnitte
Anlage 7	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>Abflusspenden 1962</b></li> </ul>	18 Klassen von Abflusspendenflächen	
Anlage 8	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>Abflusspendendifferenzen (zwischen 60er und 90er Jahren)</b> (+ Inhalte der Zeile 1)</li> </ul>	– Einzugsgebiete, wie Anlage 4. 11 Klassen von Abflusspendendifferenzen	
Anlage 9	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>Gemarkungsgrenzen (der 4 Untersuchungs-Teilgebiete)</b></li> <li>● <b>Dränauslauf</b></li> <li>● <b>Verbindungsleitungen</b></li> <li>● <b>Dränungsflächen</b></li> </ul>		Gemarkungsgrenzen der Untersuchungs-Teilgebiete
Anlage 10	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>Hydrochemische Probenahmestellen</b></li> </ul>	– BEZEICHNUNG – CA2_PPM – CL_PPM – EL_LEITF_S_CM – ENTNAHMEDATUM – GH_D – HCO3_PPM – HPO42_PPM – K_PPM – MESSSTELLENART – MESSZEITRAUM – MG2_PPM	Konzentrationsangaben in ppm

		<ul style="list-style-type: none"> <li>- NA_PPM</li> <li>- NH4_PPM</li> <li>- NO3_PPM</li> <li>- O2_PPM</li> <li>- PH</li> <li>- REDOX_MV</li> <li>- SCHUETTUNG</li> <li>- SIO2_PPM</li> <li>- SO42_PPM</li> <li>- TEMP_C</li> <li>- X-COORD</li> <li>- Y-COORD</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>Isotopenhydrologische Probenahmestellen</b></li> </ul>	<p>Wie hydrochemische Probenahmestellen; zusätzlich:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ALTER</li> <li>- C14_ALTER</li> <li>- C14_GEHALT_PMC</li> <li>- D13C-PROMILLE</li> <li>- D180_PROMILLE</li> <li>- H3T_U</li> <li>- IPKT_ID</li> <li>- REDOX_POT_MV</li> <li>- REL_ID</li> </ul>	

## **13. Anlage: CD-ROM**

### **Impressum der CD-ROM**

#### **Herausgeber**

Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG)

#### **Autoren**

Dr. Bernd Leßmann, Dr. Klaus Wiegand, Dr. Hans-Jürgen Scharpff

#### **Kartografie und Gestaltung**

Thomas Dickel, Michaela Hoffmann

#### **Herstellung und Vertrieb**

Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG)

Telefon: 0611 / 6939-739, Telefax 0611 / 6939-941

#### **Installation**

Die CD-ROM enthält Geo-Daten und Projekt-Daten, die mit dem Programm ArcExplorer geöffnet werden können. Eine Installation der Daten ist nicht notwendig. Für die Visualisierung der Karten wird ArcExplorer 1.04.144 (oder höher) benötigt, der auf der CD-ROM mitgeliefert wird. Für seine Installation entpacken Sie die Datei arcexpl.zip und rufen Sie die Datei setup.exe auf.

#### **Systemvoraussetzungen**

PC 486DX, 16 MB RAM

Windows 95

#### **Copyright**

Diese Veröffentlichung ist gesetzlich geschützt. Vervielfältigungen nur mit Erlaubnis des Herausgebers. Mit dem Erwerb des Bandes 108 der Geologischen Abhandlungen Hessen mit der CD-ROM erhält der Käufer ein einfaches, nicht übertragbares Nutzungsrecht an den auf dem Datenträger enthaltenen Daten. Der Käufer erlangt das Recht, die Karten unter Angabe der Quelle für Lehr-, Planungs- und Forschungszwecke zu verwenden.

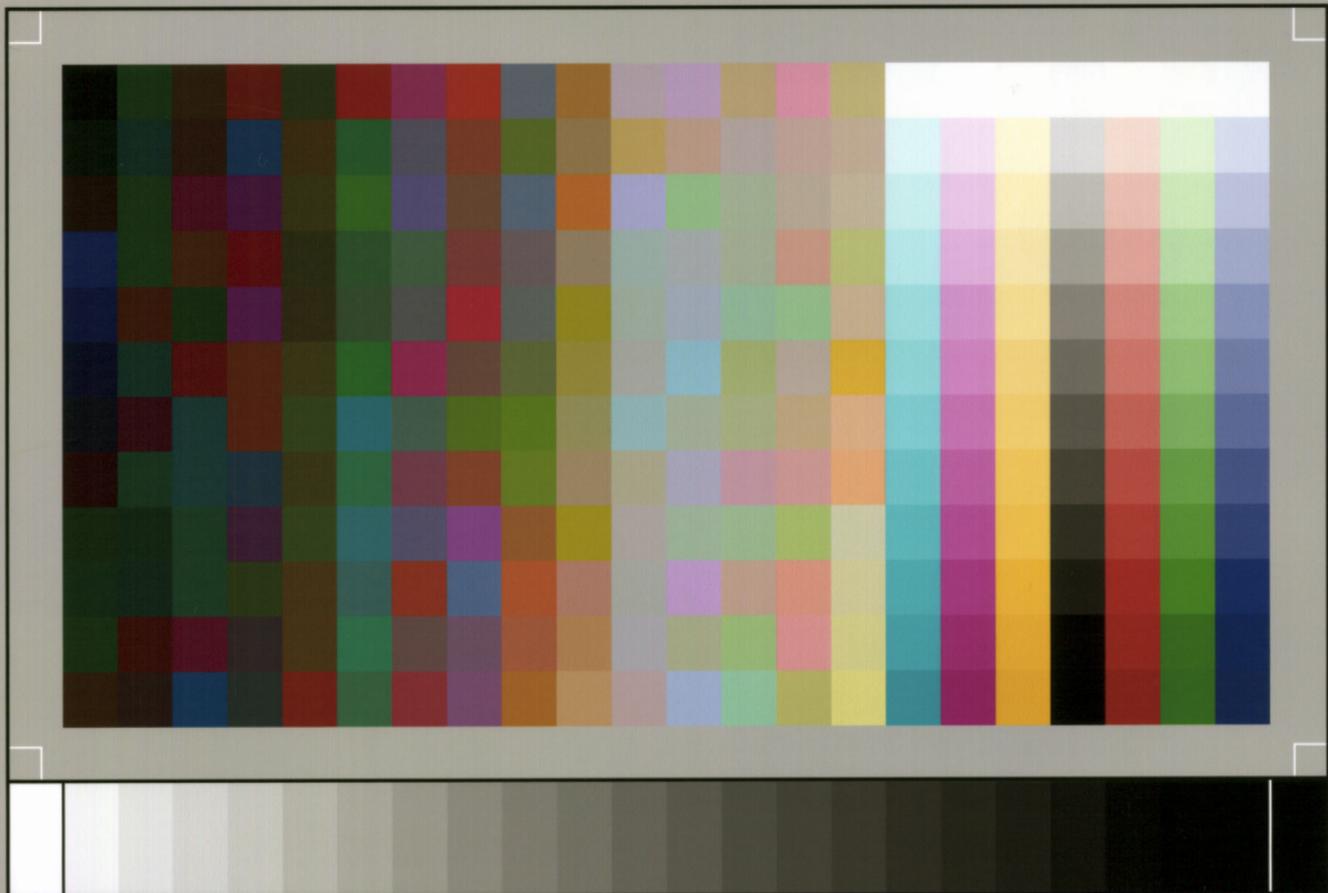
Für Darstellungszwecke wurden topografische Daten des Hessischen Landesvermessungsamtes verwendet (Verv.-Nr.: 94-3-3).

Für das auf der CD-ROM enthaltene Softwareprodukt ArcExplorer™, Version 1.04.144, ist die Lizenzbedingung der Firma Environmental Systems Research Institute, Inc., zu beachten.

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit der Daten und haftet nicht für Schäden des Käufers oder Dritter.

#### **Referenzangaben**

Leßmann, Wiegand & Scharpff (2001): Die Hydrogeologie des vulkanischen Vogelsberges. – Geol. Abh. Hessen, **108**: 144 Seiten, 65 Abb., 13 Tab., Kartenanhang - CD-ROM; Wiesbaden.



SP050509001

ScanPrint® *autopilot* Scan Target v2.0

## Kurzfassung des Inhalts

### Die Hydrogeologie des vulkanischen Vogelsberges

Mit der vorliegenden Arbeit wird die Hydrogeologie des vulkanischen Vogelsberges untersucht, eines der ergiebigsten Förder- und Reservegebiete für Grundwasser in Hessen. Das mehrschichtige Kluftgrundwasserleitersystem wird unter Verwendung geologischer, geohydraulischer, hydrologischer, hydrochemischer, isopenhydrologischer und wasserwirtschaftlicher Daten beschrieben.

Neben der Auswertung von bereits vorhandenen Daten wurden Grundwasseraustritte und Trockenfallstrecken kartiert sowie Niedrigwasserabflüsse gemessen. Da zahlreiche regionale und überregionale Wasserwerke Grundwasser zur Trinkwasserversorgung aus der Region fördern, wurden umfangreiche wasserwirtschaftliche Daten erhoben. Weiterhin wurden hydrochemische und isopenhydrologische Analysen durchgeführt.

Der Vogelsberg ist hydrogeologisch in die Zonen des Oberwaldes, der Schwebenden Grundwasserstockwerke und der Durchgehenden Grundwassersättigung untergliedert. Der Wechsel von Grundwasser leitenden mit Grundwasser gering leitenden bzw. Grundwasser nicht leitenden Schichten führt zur Ausbildung von mehreren übereinander lie-

genden Grundwasserstockwerken, die über der Zone der Durchgehenden Grundwassersättigung schwebende Grundwasserstockwerke sind. Es wurde eine zeitbezogene Zuordnung der Wassergewinnungsanlagen und Grundwassermessstellen zu einzelnen Grundwasserpotenzialflächen vorgenommen.

Das räumliche Abflussverhalten der Fließgewässer in der Vogelsberg-Region spiegelt den hydrogeologischen Aufbau und damit die Grundwasserstockwerksgliederung wider. Die Abflüsse geben Aufschluss über die hydraulische Anbindung der Vorflut an die Grundwasserstockwerke.

Die meteorischen Grundwässer und die Vorratswässer des Vogelsberges gehören einem Erdalkali-Hydrogencarbonat-Typ an. Die mittleren Verweilzeiten liegen hier bei wenigen Jahren bis Jahrhunderten. Bei den tiefen Grundwässern handelt es sich um Alkali-Hydrogencarbonat-Wässer, die mehrere tausend Jahre alt sind.

Bei Quellen, die oberflächennahes Grundwasser führen, wurde vereinzelt eine Al-Mobilisation festgestellt, die auf saure Depositionen zurückgeht.

Herausgeber © und Vertrieb:  
Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie  
Rheingaustraße 186, 65203 Wiesbaden

