

Ermittlung wasserhaushaltlicher Kenngrößen in Heilquellenschutzgebieten mit numerischem Modell am Beispiel der obervogtländischen Region

Maren Zweig, Dipl.-Geologin, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (LfUG), Abt. 3 – Wasser, Abfall, Ref. 32 – Grundwasser, Altlasten, Maren.Zweig@lfug.smul.sachsen.de

Dr. Barbara Gabriel, Dipl.-Geologin, Fritz+Frölich Umweltinformationssysteme GmbH, Erfurt, gabzig@t-online.de

Andrea Heinz, Fritz+Frölich Umweltinformationssysteme GmbH, Erfurt, ah@fundfgmbh.de

Manuela Voßberg, Dipl.-Hydrologin, Umweltbüro GmbH Vogtland, ubv.weischlitz@t-online.de

Einführung

Im Rahmen des Heilquellenprojektes Böhmen/Vogtland zur Erarbeitung eines grenzüberschreitenden Schutzkonzeptes für die Heilquellen im tschechisch-deutschen Grenzgebiet wurden umfangreiche hydrologische Untersuchungen und Datenrecherchen zur Ermittlung der Wasserhaushaltsbilanz durchgeführt. Im Heilquellenprojekt wurden zur Plausibilisierung der Wasserhaushaltsbilanz verschiedene hydrologische Verfahren angewendet.

Die vogtländischen Heilquellen befinden sich in einem paläozoischen Festgesteinsgebiet. Bei der Beurteilung des Wasserhaushaltes ist zu beachten, dass sich die Strömungsverhältnisse in den Kluftnetzen von Festgesteinen vom Grundwasserabfluss im Porenraum von Lockergesteinen unterscheiden. Im Lockergestein sickert der Teil des Niederschlags, der nicht von der Verdunstung erfasst wird, zum größten Teil flächenhaft ein und bildet Grundwasser. Auf Grund anderer Standortbedingungen (Relief, Gebirgsdurchlässigkeit, Verteilung von Klufträumen) dringt nur ein Teil des für die Grundwasserneubildung zur Verfügung stehenden Wassers in den Festgesteinskörper ein, der andere Teil fließt oberflächlich oder als Zwischenabfluss in geringer Tiefe ab und wird nach relativ kurzer Bodenpassage dem Oberflächenwasser zugeführt. Die Morphologie des Gebiets, die spezielle Beschaffenheit des Untergrundes, seiner Verwitterungsdecke und des Bodens, die hydraulische Durchlässigkeit sowie die Bodennutzung modifizieren den Abflussprozess.

Eine spezielle Methode zur Bestimmung von Wasserhaushaltsgrößen im Festgesteinsbereich bietet seit vielen Jahren das numerische Programmsystem GEOFEM, Im Heilquellenprojekt wurden die Ergebnisse der GEOFEM-Berechnungen mit denen anderer Berechnungsverfahren verglichen. Die Auswirkungen einer Aktualisierung der GEOFEM-Datenbasis auf die Wasserhaushaltsberechnung werden diskutiert.

Das Wasserhaushaltsprogramm GEOFEM

Das Programmsystem **GEOFEM** ist ein Informationssystem zur Berechnung langjähriger mittlerer Wasserhaushaltsdaten im Festgesteinsbereich von Thüringen und Sachsen. Das Programm arbeitet auf der Basis des von GABRIEL, JACOBS & ZIEGLER (1984) entwickelten rasterbezogenen Wasserhaushaltsmodells GEOFEMLAW (**Festgesteinsmodell** für den langjährig mittleren **Wasserhaushalt** unter Beachtung hydrogeologischer Verhältnisse).

GEOFEM nutzt wie das Rechenprogramm Raster (GLUGLA, ET AL. u. a. 1979, 1981) die Verknüpfung von Wasser- und Wärmehaushalt auf der Grundlage des BAGROV-Verfahrens (Gabriel et al. 1984). Das Programmsystem berechnet aus einem rasterbezogenen Grunddatensatz nach verschiedenen empirisch-statistischen Verfahren flächenbezogene Wasserhaushaltskomponenten. Zur Bestimmung des Gebietsniederschlags wurde ein hypsometrisches Verfahren entwickelt (GABRIEL et al. 1986). Mit dem Programm ist es möglich, ohne zusätzliche Messungen die langjährig mittlere Rate der Grundwasserneubildung (GWN) mit Angabe der schnellen (überwiegend hypodermischer Abfluss) und langsamen Abflussanteile (Basisabfluss) unter den Bedingungen der Abflusskonzentration im langjährigen Verhalten entsprechend den konkreten Standortbedingungen zu berechnen. Punktuelle oder linienhafte GWN (z. B. bei Hochwasser), unterirdische Grundwasserzugänge aus Versinkungen (z. B. im Karst) können mit dem Verfahren standardmäßig nicht berücksichtigt werden.

Die Programmanwendung basierte bis 2003 auf Rasterdaten, die in den 1980er Jahren für den Festgesteinsbereich der ehemaligen DDR im Rahmen der Überarbeitung des N-A-U-Kartenwerkes flächendeckend ermittelt wurden. Für Thüringen wurde ein Raster mit Berechnungseinheiten (BE) 500 m x 500 m (0,25 km²), für Sachsen eine Rastergröße von 707 m x 707 m (0,5 km²) zu Grunde gelegt. Für insgesamt ca. 100.000 BE wurde eine detaillierte manuelle Erfassung der Gebietsparameter Geländehöhe, Hangneigungsrichtung und -betrag, Landnutzung und Gewässerbedeckung realisiert. Als Bezugsreihe für den Niederschlag wurde die Jahresreihe 1951/75 verwendet. Mit der GEOFEM-Standardberechnung wurden bis 2003 die folgenden Gebietswerte (nicht die arithmetischen Mittelwerte) der zu einer beliebigen Gebietsfläche gehörenden Wasserhaushaltsgrößen ermittelt:

- unkorrigierten Niederschlag (P1),
- höhen- und windfehlerkorrigierter Gebietsniederschlag (P0korr),
- potenzielle und reale Gebietsverdunstung (ETP, ETR),
- potenzieller Gesamtabfluss (QR),
- Direktabfluss (RD),
- Grundwasserneubildung (GWN) mit schnellen und langsamen Grundwasserabflussanteilen (RU, RB).

Die Ermittlung der Wasserhaushaltsdaten pro Rasterfläche wurde auf oberirdische Einzugsgebiete bezogen. Im Rahmen einer Spezialberechnung bietet GEOFEM zusätzlich die Möglichkeit zur Abschätzung der Auswirkungen von Landnutzungsänderungen wie Vernässung oder Versiegelung sowie des gebietsbezogenen Grundwasserdargebots im Sinne des Nied-

rigwasserabflusses. Die Methodik ist im Rahmen umfangreicher Feldversuche in Thüringen und durch den Vergleich mit den Ergebnissen langjähriger Durchflussmessungen an Pegeln in Sachsen und Thüringen getestet worden.

Die teilweise hohen GWN-Raten nach GEOFEM dürfen nicht mit herkömmlich ermittelten Angaben zur GWN verwechselt werden. Im Berechnungsergebnis sind sowohl die schnell als auch die langsam abfließenden Grundwasserabflussanteile enthalten. Nach HÖLTING (1992) gehört der hypodermische Abfluss nicht zum Grundwasser, bei der GEOFEM-Berechnung werden die Wasserhaushaltskomponenten potenzieller Gesamtabfluss (QR) mit den Anteilen Direktabfluss (RD) und Grundwasserneubildung (GWN) nacheinander bestimmt. Im Berechnungsergebnis zur GWN sind weiterhin sowohl schnell als auch langsam abfließende Grundwasserabflussanteile enthalten.

Von Bedeutung ist der summarische Gebietsparameter Gewässerzahl (GZ). Die GZ ist eine dimensionslose Vergleichszahl und beschreibt die die Verdunstung begünstigenden Flächenanteile einer Rasterfläche. Sie wird sowohl zur Verknüpfung von Wärme- und Wasserhaushalt als zur Grundwasserneubildungsberechnung verwendet. Zur Ermittlung der GZ wurden bis 2003 Karteninformationen über vorhandene Standgewässer, Fließgewässer, Quellen und Feuchtfelder mit Hilfe einer Matrix in den „die Verdunstung begünstigenden Flächenanteil“ einer Rasterfläche umgerechnet. Die „Restfläche“ wird „für die Grundwasserneubildung zur Verfügung stehend“ gewertet. Mit Hilfe der GZ wird also die standortbezogene Verdunstungsfähigkeit sowie der Anteil der Grundwasserneubildung am Gesamtabfluss ermittelt. Ein geringer Wert der GZ (0,75 oder 1,0) kennzeichnet infolge hoher Versickerungsraten in der Regel auch eine hohe Rate der GWN, dagegen weist eine höhere GZ (>3,5) auf eine erhöhte Verdunstungsrate und demzufolge eine geringe Rate der GWN hin. Für die verschiedenen hydrogeologischen Einheiten in Thüringen wurden die in Tabelle 1 genannten Wertebereiche der Gewässerzahl ermittelt:

Beschreibung der Schichtenfolge	GZ
verkarstete Kalksteine und Riffkalke (Devon, Zechstein, Muschelkalk)	bis 1,0
nichtverkarstete, gut geklüftete Kalksteine (Unterer Muschelkalk), gut geklüfteter Sandstein (Mittlerer Buntsandstein)	1,0 bis 2,0
weniger gut geklüftete Kalksteine und Sandsteine (Oberer Muschelkalk, Unterer Buntsandstein), Sandsteine, Konglomerate des Rotliegend	1,5 bis 2,5
geklüftete magmatische Gesteine (z.B. Granite, Porphyre im Thüringer Wald, Basalt)	2,0 bis 3,0
weniger gut geklüftete bzw. verwitterte magmatische Gesteine	2,5 bis 3,5
verwitterte gut geklüftete Tonsteine, Schiefertone (Mittlerer Keuper)	3,0 bis 4,5
weniger geklüftete Tonsteine (Keuper), Tonschiefer im Thüringer Schiefergebirge, Kristallin und Migmatite (Gneis)	3,5 bis 5,5
gering geklüftete Schiefer, Grauwacken (Kulm)	5,0 bis 7,5

Tabelle 1: Hydrogeologische Zuordnung von Wertebereichen der Gewässerzahl (aus: Programmbeschreibung GEOFEM 2000)

Das GEOFEM-Programmsystem wurde 1995 für Thüringen und 1999 für Sachsen als geschlossenes PC-Programm mit Einbindung in eine Windows-Umgebung und Anschluss an eine Oracle-Datenbank sowie an das GIS ArcView für den Routinebetrieb entwickelt. Zusätzlich wurde für Thüringen und Sachsen eine GEOFEMLight-Version auf CD-ROM erstellt. Die Light-Version ist eine reduzierte Programmvariante zur Nutzung durch Dritte.

Bei der Arbeit mit GEOFEM wurde festgestellt, dass sowohl bei der manuellen bzw. visuellen Ermittlung der Daten aus den in den 1980er Jahren verfügbaren topografischen Karten als auch bei den manuellen Dateneingaben und der Datenübertragung Fehler aufgetreten sind, so dass umfangreiche Datenkontrollen und Korrekturen erforderlich wurden.

Eine grundlegende **Weiterentwicklung von GEOFEM** erfolgte in den Jahren 2002 – 2003. Im Auftrag der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie und des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie wurden alle Grunddaten (Gebietsparameter und Gebietsniederschlag) auf digitaler Basis neu ermittelt. In diesem Zusammenhang wurde auch das Programm weitgehend überarbeitet. Die methodischen Grundlagen wurden dabei allerdings nicht verändert. Durch die Aktualisierung der Datenbasis wurden Ungenauigkeiten, Fehler und subjektive Einflüsse bei der Ermittlung der Grunddaten entfernt. Die Genauigkeit der Ergebnisse der Standardberechnung konnte damit wesentlich verbessert werden

Wesentliche Änderungen in GEOFEM²⁰⁰³:

- Die Rastergröße der Berechnungseinheiten für Sachsen wurde auf 500 m x 500 m verringert und damit der Rastergröße Thüringens angepasst.
- Der Gebietsniederschlag wurde mit den korrigierten Niederschlagsdaten der Jahresreihe 1961/90 des DWD aktualisiert. Durch die Verwendung bereits korrigierter Niederschlagsdaten des DWD entfällt das bisher verwendete und sehr aufwendige Verfahren zur Ermittlung von P0korr.
- Alle Grunddaten wurden auf aktueller digitaler Datenbasis bestimmt. Geländehöhe, Hangneigung und Azimut wurden auf der Grundlage des DGM25 – Digitalen Geländemodells für Thüringen und Sachsen neu bestimmt. Die Ermittlung der Landnutzungen und der Gewässerbedeckung für Fließgewässer, Standgewässer und Quellen erfolgte auf der Grundlage des ATKIS-DLM25.
- Die bisherige Ermittlung der Gewässerzahl mit Hilfe einer Matrix wurde auf die reproduzierbare Verwendung digital bestimmter Daten (z. B. der Flächenanteile mit Fließ- und Standgewässern pro BE) umgestellt.
- Versiegelung wird bereits bei der Standardberechnung berücksichtigt, verwendet werden digital bestimmte Flächenanteile pro BE.

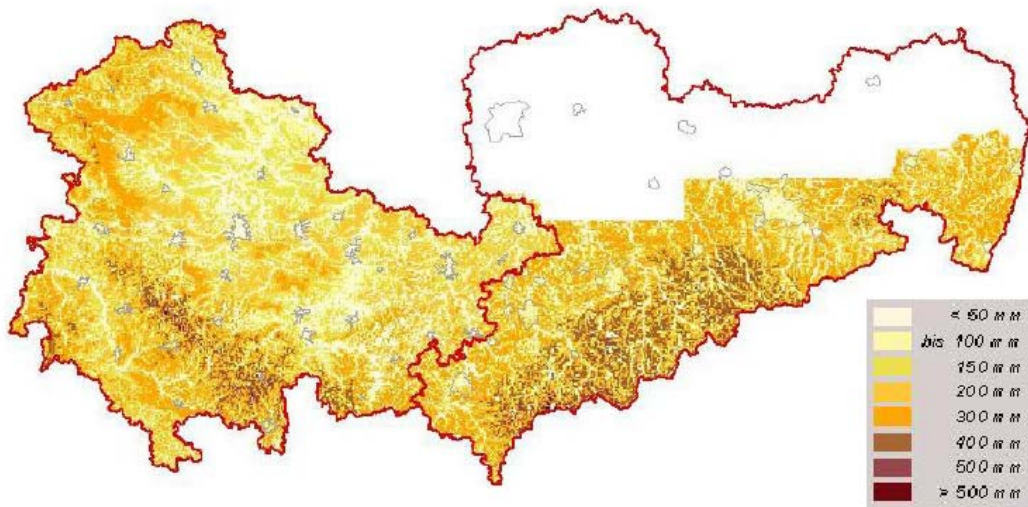


Abb. 1 : Rate der Grundwasserneubildung (GWN) des Berechnungsrasters für Thüringen und Sachsen nach GEOFEM²⁰⁰³ (aus: GABRIEL & HEINZ 2003)

Wasserhaushaltsberechnungen für die Heilquellengebiete

Im Rahmen des Heilquellenprojektes zur Erarbeitung eines grenzüberschreitenden Schutzkonzeptes für die Heilquellen war auch eine Wasserhaushaltsbilanzierung für die obervogtländischen Einzugsgebiete der Weißen Elster (von der Quelle bis zum Pegel Adorf) und das Einzugsgebiet des Röthenbaches (von der Quelle bis zum Pegel Festhalle in Bad Brambach) erforderlich. Für die Teileinzugsgebiete der Weißen Elster (Rauner Bach AE = 45 km²), Schwarzbach AE = 55 km²), Einzugsgebiet Heilquellen Bad Elster AE = 58, Zwischengebiet Weiße Elster AE = 13 km²) sowie das Gesamtgebiet (AE = 171 km²) und für das Teileinzugsgebiet des Röthenbaches (Heilquellen Bad Brambach AE = 8,5 km²) waren die Wasserhaushaltskomponenten zu bestimmen (vgl. Abb. 2).

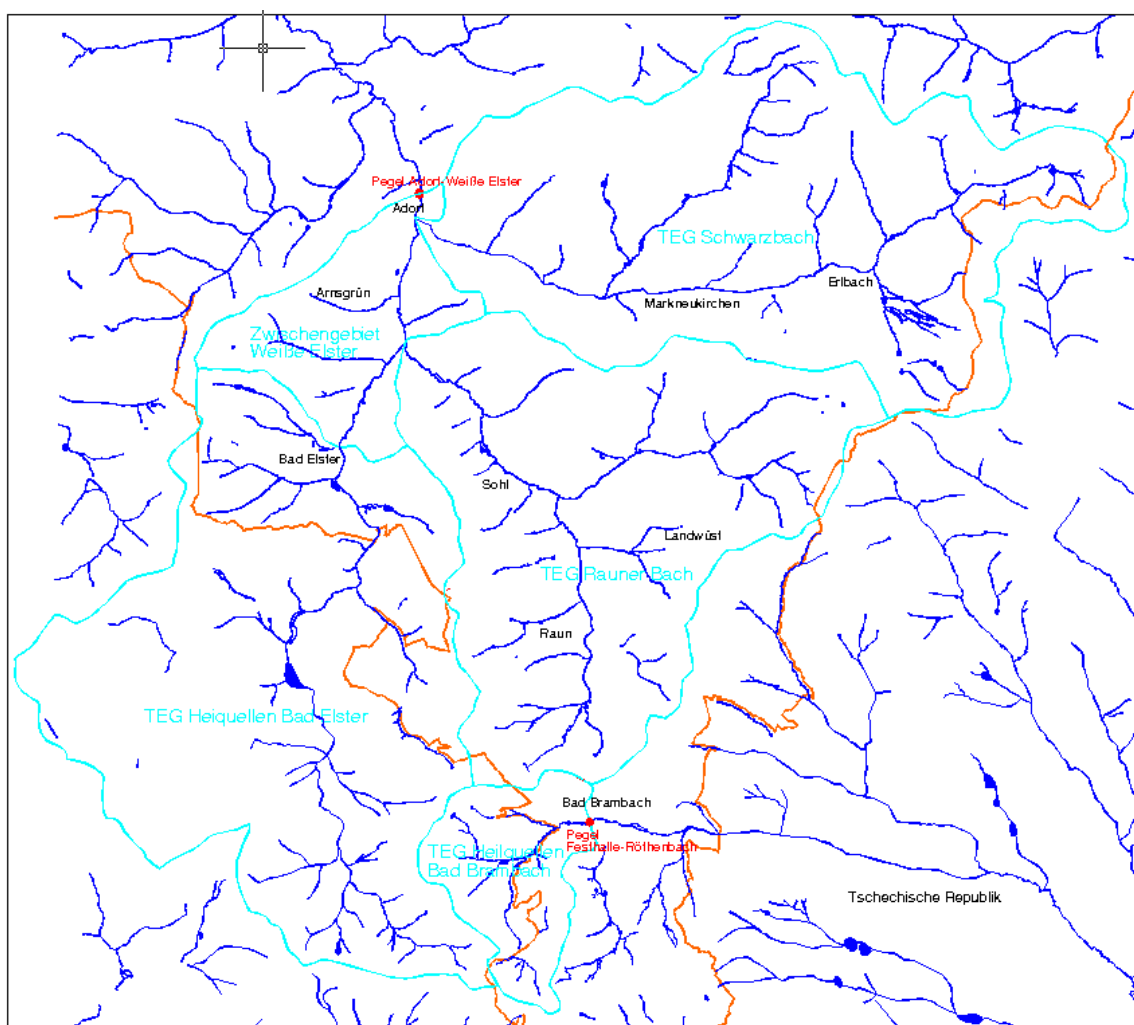


Abb. 2: Übersichtskarte zu den bearbeiteten Teileinzugsgebieten des Heilquellenprojektes. Dargestellt sind die Einzugsgebietsgrenzen, die Staatsgrenze zur Tschechischen Republik, das Gewässernetz sowie die Oberflächenwassermessstellen Pegel Adorf Weiße Elster und Pegel Festhalle Bad Brambach. (aus: VOßBERG et al. 2003)

Primärdatenerfassung im Randgebiet

Eine GEOFEM-Berechnung für grenznahe bzw. grenzüberschreitende Einzugsgebiete des Festgesteins war mit dem Grunddatenbestand von GEOFEM nicht möglich, da ursprünglich keine Primärdaten im Grenzbereich erhoben werden konnten (vgl. Beispiel Gebiet Röthenbach in Abb. 3).

Die Primärdaten im Grenzbereich wurden 1999 von den Projektbearbeitern nachträglich erfasst. Insgesamt wurden 163 Berechnungspunkte neu aufgenommen, um die beiden Untersuchungsgebiete mit GEOFEM abbilden zu können. Zu diesen BE-Punkten wurden folgende Daten von topografischen Karten im Maßstab 1:25.000 bzw. 1:10.000 abgegriffen:

NAU-Koordinaten des Rasters (das ursprüngliche GEOFEM-Berechnungsraster beruhte auf NAU-Koordinaten, diese wurden programmintern in Gauß-Krüger-Koordinaten transformiert), Quadranten-Nr., Messtischblatt-Nr., Flussgebiet, Geländehöhe [mHN], Hangneigung [%], Azimut, Bodennutzungsart, Gewässerbedeckung, Anzahl Flüsse / Quellen.

Zusätzlich wurden alle im Bearbeitungsgebiet vorhandenen Niederschlagsstationen (7 auf deutscher und 3 auf tschechischer Seite) mit ihren verfügbaren Daten (Geländehöhe, Beobachtungszeitraum, langjährige mittlere Niederschlagssumme) erfasst, um die notwendige Zuordnung von Niederschlagsstationen zu den neu erfassten Rasterflächen (BE) zu ermöglichen.

Nach Ergänzung der Primärdaten für die Grenzbereiche des Untersuchungsgebietes konnte im Jahr 2001 eine einzugsgebietsbezogene Wasserhaushaltsberechnung mit der GEOFEM-Version des LfUG erfolgen.

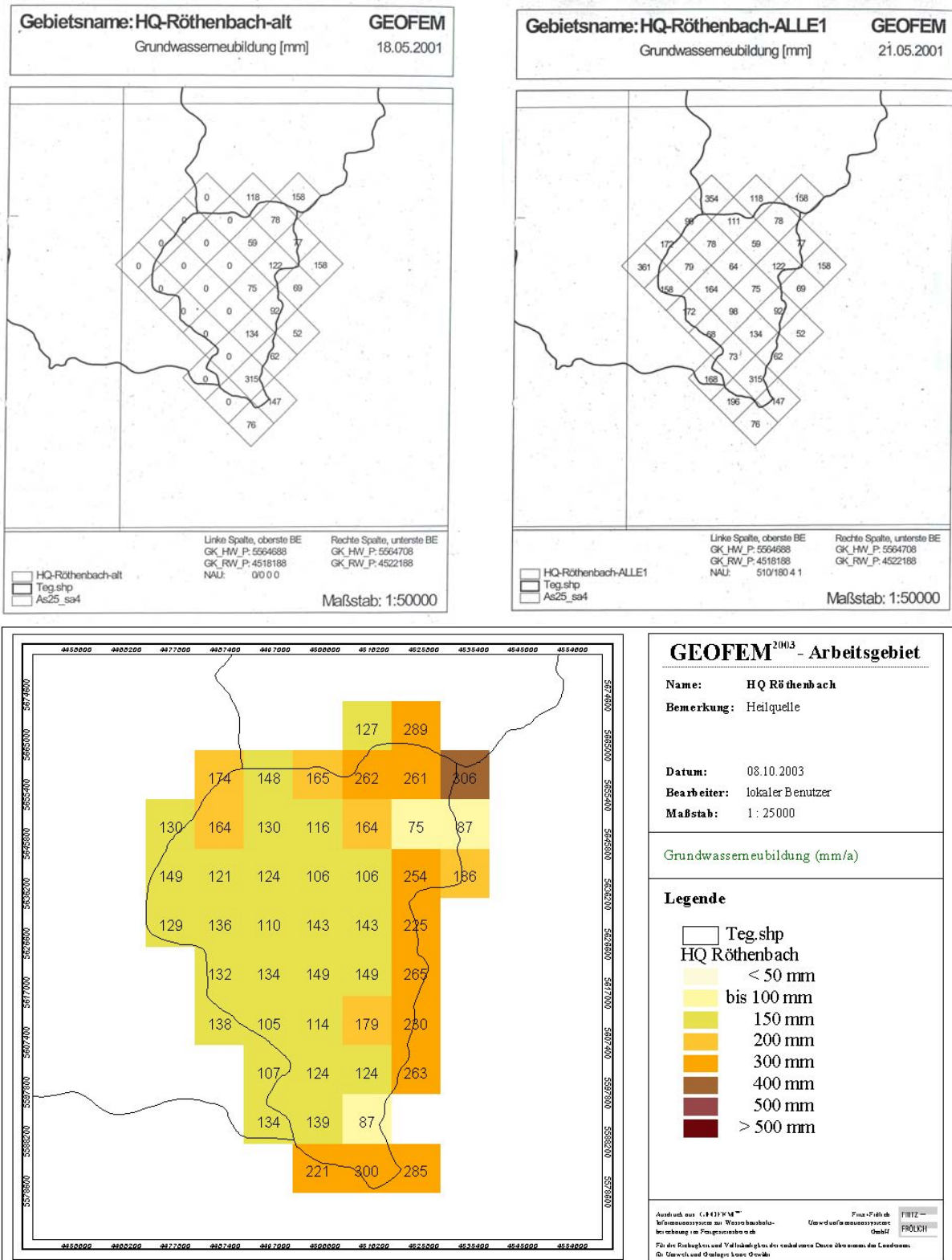


Abb. 3: Karte links: GEOFEM-Berechnung zum Einzugsgebiet Röthenbach (Bad Brambach) mit dem ursprünglichen Primärdatenbestand von GEOFEM (Stand 2000). Die Rasterflächen mit dem Ergebnis „0“ zeigen die Bereiche mit fehlenden Primärdaten an. Karte rechts: GEOFEM-Berechnung zum Einzugsgebiet Röthenbach mit der ergänzten GEOFEM-Version (Stand 2001), die Rand- und tschechischen Bereiche des Gebietes sind mit Primärdaten belegt, die einzugsgebietsbezogene Wasserhaushaltsberechnung kann erfolgen. Karte unten: GEOFEM-Berechnung mit der aktuellen Version GEOFEM²⁰⁰³ mit digitalem Grunddatenbestand

Berechnungen mit GEOFEM

Die beiden Einzugsgebiete Weiße Elster und Röthenbach werden in dem ergänzten GEOFEM (Datenstand 2001) durch insgesamt 441 BE abgebildet. Nach Abschluss der Arbeiten zum Heilquellenprojekt wurden Vergleichsrechnungen mit der überarbeiteten Version GEOFEM²⁰⁰³ mit dem aktuellen digital ermittelten Grunddatenbestand durchgeführt. Die Ergebnisse der GEOFEM-Berechnung sind in Tabelle 3 für das Teileinzugsgebiet Röthenbach beispielhaft dargestellt.

Mit der aktuell verfügbaren Version GEOFEM²⁰⁰³ wurde infolge der veränderten Datenlage (Niederschlagsdaten des DWD) für das Einzugsgebiet der Weißen Elster durchschnittlich eine um ca. 100 mm höhere Summe der mittleren Jahresniederschlagshöhe berechnet. Die Werte der realen Verdunstung sind dagegen bei GEOFEM²⁰⁰³ vergleichsweise geringfügig (im Mittel um ca. 10 mm) erhöht. Mehr als 90 % der erhöhten Niederschlagssumme werden somit durchschnittlich in der Rate des Gesamtabflusses berücksichtigt. Weiterhin wurden vergleichsweise erhöhte GWN-Raten und verminderte Raten für den Direktabfluss (RD) ermittelt. Mit der aktuellen Version von GEOFEM²⁰⁰³ sind auch deutlich höhere Raten für die langsam abfließenden Anteile des Grundwasserabflusses berechnet worden, für das Einzugsgebiet der Weißen Elster ca. 100 mm. Diese Unterschiede sind einerseits auf die bereits erhöhte Rate des Gesamtabflusses (QR) zurückzuführen, andererseits werden sie durch den Berechnungsparameter Gewässerzahl verursacht, Denn in der aktuellen Version des GEOFEM²⁰⁰³ werden deutlich niedrigere GZ bestimmt.

Die GZ wurde bisher in allen GEOFEM-Versionen hydrografisch als Anteil der Gewässerbedeckung einer Berechnungseinheit unter Berücksichtigung der Höhe des jeweiligen Gebietsniederschlages ermittelt. Bei der Entwicklung von GEOFEM²⁰⁰³ war es möglich, die Algorithmen zur Bestimmung der Gewässerzahl zu erweitern und sowohl die Hangneigung als auch die prozentualen Anteile versiegelter Anteile versiegelter Flächen bei der Ermittlung der GZ zu berücksichtigen. Direkte Informationen zu den hydrogeologischen und bodenkundlichen Verhältnissen wurden nicht berücksichtigt.

Mit den in verschiedenen Gebieten bisher durchgeführten Berechnungen wurde deutlich, dass in der präzise digital bestimmten GZ die Einflüsse des Untergrundes (Böden, hydrogeologische Verhältnisse) teilweise nicht ausreichend berücksichtigt sind. Deshalb wurden im Rahmen der Weiterentwicklung des Programms verschiedene Testrechnungen mit modifizierten GZ-Werten durchgeführt (Tabelle 2). Dabei wurde u. a. folgende Zuordnung genutzt (aus: AUTORENKOLLEKTIV 1989):

Bodeneigenschaften	GZ Wertebereich
Böden mit hohen Infiltrationsraten, auch bei völliger Durchnässung	0,75 bis 1,5
Böden mit mäßigen Infiltrationsraten bei völliger Durchnässung	>1,5 bis 2,5
Böden mit geringen Infiltrationsraten bei völliger Durchnässung	>2,5 bis 5,0
Böden mit sehr geringen Infiltrationsraten bei völliger Durchnässung	>5,0

Hydrogeologie	GZ-Wertebereich
geklüftete magmatische Gesteine	2,0 - 3,0
Kristallin und Flysch (Devon)	2,5
weniger gut geklüftete bzw. verwitterte magmatische Gesteine	2,5 – 3,5
Kieselschiefer/Quarzite	2,5 – 3,0
Schieferton- und Tonschieferfazies	4,5
gering geklüftete Schiefer, Grauwacken, Kulmfazies	5,0 – 7,0

Weiße Elster		Röthenbach		Rauner Bach		Schwarzbach		TEG Weiße Elster	
G ²⁰⁰³	G ²⁰⁰³ GZ _{hyg}	G ²⁰⁰³	G ²⁰⁰³ GZ _{hyg}	G ²⁰⁰³	G ²⁰⁰³ GZ _{hyg}	G ²⁰⁰³	G ²⁰⁰³ GZ _{hyg}	G ²⁰⁰³	G ²⁰⁰³ GZ _{hyg}
1,63	2,54	1,79	2,26	1,40	2,63	1,64	2,38	1,66	2,89

Tabelle 2: Vergleich der mit GEOFEM²⁰⁰³ ermittelten GZ (Gebietswerte) und den vorläufig hydrogeologisch modifizierten Angaben GZ_{hyg}

Die Zuordnung der GZ_{hyg} ist auch an Hand der geologischen Karte (Abb. 4) nachvollziehbar.

Abb. 4: Geologische Karte des Untersuchungsgebietes (aus: MIßLING, K. & DVORAK, J. 2002)

Gebietskennwerte GEOFEM / Standard

Gebietsinformationen (Datenstand)		GEOFEM (2002)	GEOFEM²⁰⁰³ (2003)	GEOFEM²⁰⁰³ (2003-hyg)
Berechnungsgebiet berücksichtigt	BE	32	48	48
Beinhaltet Fläche von	km ²	16,00	12,00	12,0
Mittlere Geländehöhe	m NN	654	653	653
Mittelwert für Gewässerzahl (GZ)		2,52	1,79	2,46
Berechnete Jahressummen für langjährig mittlere Wasserhaushaltsdaten				
Gebietsniederschlag (P1) ohne Windfehlerkorrektur/P/DWD	mm	802	810	810
Schneeanteil	mm	281	nn	nn
Gebietsniederschlag (P0korr) mit Windfehlerkorrektur/Pkorr:	mm	925	923	923
Potenzielle Gebietsverdunstung (ETP)	mm	618	569	569
Reale Gebietsverdunstung (ETR)	mm	578	518	535
Berechnete Jahressummen für langjährig mittlere Abflüsse				
Potenzielles Gesamtwasserdargebot (Gesamtabfluss – QR)	mm	347	405	388
Direktabfluss (RD)	mm	244	258	266
Grundwasserneubildung (GWN)	mm	103	147	122
Grundwasserabfluss mit geringer Verweilzeit im Untergrund (schnelle Komponente – RB)	mm	12	13	31
Grundwasserabfluss mit langer Verweilzeit im Untergrund (langsame Komponente – RU)	mm	91	135	90

Tabelle 3: Berechnungsergebnisse GEOFEM für das Einzugsgebiet Röthenbach-Bad Brambach (aus: VOßBERG, M., LEIBENATH, C., DAFFNER, T. 2003, ergänzt durch Ergebnisse nach GEOFEM²⁰⁰³ – aktuelle Version und GEOFEM²⁰⁰³ mit GZ_{hyg})

Infolge der in GEOFEM²⁰⁰³ veränderten Rastergröße werden trotz geringer erfasster Fläche (16,00 km² / 12,00 km²) eine größere Anzahl BE berücksichtigt. Die mit GEOFEM wesentlich höhere Angabe der Gebietsgröße resultiert daraus, dass alle durch das Polygon erfassten BE in die Berechnung einbezogen werden.

Der Gebietsniederschlag (P1) ohne Windfehlerkorrektur wird in GEOFEM²⁰⁰³ durch den Wert P/DWD ersetzt, der Gebietsniederschlag (P0korr) mit Windfehlerkorrektur durch das berechnete Pkor. Diese Vergleiche treffen nur bedingt zu, da im Wert P/DWD bereits eine durch den DWD vorgenommene Korrektur der Niederschlagshöhe enthalten ist. Der Schneeanteil kann in GEOFEM²⁰⁰³ nicht mehr bestimmt werden.

Für das Gesamtgebiet Weiße Elster Pegel Adorf sowie für das Teil-Einzugsgebiet des Röthenbaches bis Pegel Festhalle konnte der mit GEOFEM berechnete Gesamtabfluss mit dem langjährigen Mittelwert der Beobachtungsreihe Abfluss verglichen und auf Plausibilität geprüft werden.

Der mit GEOFEM berechnete Gesamtabfluss (auch als potenzielles Gesamtwasserdargebot bezeichnet) bildet im langjährigen Mittel die Differenz zwischen dem höhen- und windfehlerkorrigierten Gebietsniederschlag (PO_{korrr}) und der realen Gebietsverdunstung (ETR), wobei sich der Gesamtabfluss (QR) aus den Komponenten Direktabfluss (RD) und Grundwasserneubildung ($GWN = RB + RU$) zusammensetzt. Da die an Oberflächenwassermessstellen festgestellte mittlere Abflusshöhe die Grundwasserneubildung nur teilweise erfasst, sind die erhaltenen Unterschiede der Abflusshöhen beider Verfahren verständlich (z. B. beim Röthenbach Pegel Festhalle 347 mm/a nach GEOFEM (basierend auf Niederschlagsreihe 1951-75) und 277 mm/a nach der Beobachtungsreihe Wasserstand 1982-94 aus W-Q-Beziehung; bei der Weißen Elster Pegel Adorf 324 mm/a nach GEOFEM bzw. 312 mm/a nach der Beobachtungsreihe Abfluss 1926-97). Unterschiedliche Abflusswerte können auch darauf hinweisen, dass oberirdisches und unterirdisches Einzugsgebiet nicht übereinstimmen.

Die Berechnungsergebnisse in Tabelle 3 zeigen, dass sich die Verwendung der GZhyg in GEOFEM²⁰⁰³ nicht auf die Bestimmung des Gebietsniederschlags und der potentiellen Verdunstung auswirkt. Die ermittelten Raten der GWN und der Abflussanteile weichen im Mittel kaum von denen der älteren GEOFEM-Version mit Datenstand 2001 ab. Am geringsten sind die Abweichungen der Berechnungsergebnisse für die Raten der langsam abfließenden Anteile der GWN.

Außerdem wurden zur Darstellung des Wasserhaushaltes in den beiden Gebieten weitere Verfahren angewandt, die einen Vergleich und eine Bewertung der Ergebnisse untereinander ermöglichen.

Vergleich der Ergebnisse GEOFEM mit anderen Verfahren

Bei den wasserhaushaltlichen Berechnungen für das Heilquellenprojekt lag das Hauptaugenmerk auf der Bestimmung der Grundwasserneubildung, denn darauf basierend waren das Grundwasserdargebot für die beiden Heilquellengebiete Bad Brambach und Bad Elster abzuleiten. Neben dem Programm GEOFEM kamen auch andere Verfahren zur Bestimmung der Neubildung im Festgesteinsbereich zur Anwendung. Dies waren:

- Grundwasserspendenschlüssel nach KRAFT & SCHRÄBER (KRAFT, W., SCHRÄBER, D. 1982)
- Niedrigwasserabflussauswertung nach KILLE (1970)

In der Tabelle 4 sind die Ergebnisse zur Neubildungsberechnung nach den genannten Verfahren für die betrachteten Teileinzugsgebiete des Heilquellenprojektes zusammengestellt.

Oberirdisches Teil-EZG	GWN nach GEOFEM 2002	GWN nach GEOFEM 2003	GWN nach GEOFEM 2003 mit GZ-hyg	GWN nach KRAFT & SCHRÄBER GW-Dargebot (=Summe aller positiven Bilanzglieder für einen GW-Abschnitt)	GWN mittels Verfahren nach KILLE RU _{teilw.}
	RU	RU	RU		
Basierend auf Reihe	1951 – 75	1961 - 90	1961 - 90	P0korr nach GEOFEM 1951/ 75	Vorliegende Beobachtungreihe Abflüsse
	[mm/a] / [l/(s * km ²)]	[mm/a] / [l/(s * km ²)]	[mm/a] / [l/(s * km ²)]	[mm/a] / [l/(s * km ²)]	[mm/a] / [l/(s * km ²)]
Gesamtgebiet Weiße Elster bis Pegel Adorf	42 1,3	98 3,1	56 1,8	71 2,2	129 4,1
Teil-EZG Zwischengebiet Weiße Elster	36 1,1	-	-	88 2,8	-
Teil-EZG Heilquellen Weiße Elster	36 1,1	97 3,1	38 1,2	101 3,2	-
Teil-EZG Schwarzbach	82 2,6	58 1,8	63 2,0	50 1,6	-
Teil-EZG Raurner Bach	37 1,2	118 3,7	39 1,2	68 2,2	-
Teil-EZG Röthenbach	91 2,9	44 1,4	90 2,9	176 5,6	47 1,5

Tabelle 4: Vergleich der Ergebnisse der Grundwasserneubildungsberechnung im Heilquellenprojekt nach verschiedenen Verfahren (aus: VOßBERG, M., LEIBENATH, C., DAFFNER, T. 2003, ergänzt durch Ergebnisse nach GEOFEM²⁰⁰³ – aktuelle Version und GEOFEM²⁰⁰³ Version mit GZhyg)

Auf den ersten Blick scheinen die Ergebnisse aus Tabelle 4 eine große Schwankungsbreite einzunehmen. Eine Interpretation der Differenzen hinsichtlich der mit den angegebenen Ergebnissen jeweils erfassten Abflusskomponenten ist daher unbedingt erforderlich, wobei die entsprechenden Berechnungsansätze, verwendeten Eingangsdaten und Korrekturfaktoren der angewandten Verfahren bei einem Ergebnisvergleich zu berücksichtigen sind.

Die gewässerstatistischen Verfahren beruhen auf der Annahme, dass der Abfluss in Trockenperioden für den Grundwasserabfluss repräsentativ ist. Im Verfahren nach KILLE erfolgt die Ermittlung der GWN ohne den hypodermischen Abflussanteil, was der eigentlichen Definition nach HÖLTING, B. (1982) entspricht. Die grafisch ermittelten Grundwasserneubildungswerte nach KILLE für das EZG Weiße Elster bis Pegel Adorf und für das Teilgebiet Röthen-

bach korrelieren mit den jeweiligen Niedrigwasserabflussspenden der Sommermonate, während die Niedrigwasserabflussspenden im Winter in beiden Gebieten in der gleichen Größenordnung liegen. Die Unterschiede können als Hinweis auf unterschiedliche Speicherkapazitäten der Einzugsgebiete gewertet werden, sie bilden nicht unmittelbar die Neubildungsraten ab.

In die empirische Grundwasserneubildungs-Abschätzung nach **KRAFT & SCHRÄBER** gehen im Wesentlichen lithologische und tektonische Merkmale (Gesteinsart, Zerrüttungsgrad – auch tektonische Störung, Klüftungsfreundlichkeit des Gesteins, Profildurchlässigkeit) sowie die mittlere jährliche Niederschlagssumme der jeweiligen Gebiete ein. Für das Einzugsgebiet Röthenbach wurden im Vergleich zu den Teilgebieten der Weißen Elster aufgrund des weit verbreiteten Granits eine größere Klüftungsfreundlichkeit, ein höherer Zerrüttungsgrad sowie ein wesentlich höherer Niederschlagswert angenommen. Dies führt erwartungsgemäß zu deutlich höheren Neubildungsraten und zu höheren Werten des Grundwasserdargebotes, die aus den Schlüsselkurven nach **KRAFT & SCHRÄBER** abgeleitet wurden. Die vergleichsweise hohen Werte können darin begründet sein, dass in diesem Verfahren hydrometeorologische Parameter - insb. Verdunstungsraten – nur indirekt einbezogen werden und naturräumliche Besonderheiten des betrachteten Einzugsgebietes nicht berücksichtigt werden können.

Das Ergebnis der **KRAFT & SCHRÄBER** - Berechnung stellt im eigentlichen Sinne der Verfahrensautoren das Grundwasserdargebot dar (vgl. **KRAFT, W., SCHRÄBER, D. 1982**). Die Grundwasserneubildung aus Niederschlag ist nach DIN 4049 Teil 3 eine Teilmenge des Grundwasserdargebotes und wird demnach bei Ansatz des Grundwasserspendenschlüssels von **KRAFT & SCHRÄBER** überschätzt.

In der flächenbezogenen GWN nach **GEOFEM** sind sowohl schnell abfließende („RB“ = hypodermischer Abfluss) als auch langsam abfließende Komponenten („RU“) enthalten. Diese Komponenten werden getrennt ausgewiesen. Für den Vergleich konnten in die Tabelle 4 nur die RU-Werte übernommen werden, die nach **THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR UMWELT (1994)** den Grundwasserneubildungsraten mit Verweilzeiten über einem Jahr entsprechen. Punktuelle oder linienhafte GWN durch Infiltration aus den Vorflutern sowie Kommunikation von Grundwasserabflüssen benachbarter unterirdischer Einzugsgebiete und Ausgleichswirkungen bei Trockenwetterverhältnissen (Speicherkapazitäten) bleiben in der **GEOFEM**-Standardberechnung unberücksichtigt.

Die Bearbeiter des Heilquellenprojektes haben aus den genannten fachlichen Gründen den weiteren Aussagen zur mittleren Wasserbilanz und zum Grundwasserdargebot die mit **GEOFEM** berechneten Grundwasserneubildungsraten zugrunde gelegt.

Literatur

- AUTORENKOLLEKTIV (1989): „Das Grundwasser – Einfluss der landwirtschaftlichen Produktion.“ - Wasserwirtschaftsdirektion Saale-Werra, Forschungsbereich Erfurt
- BAMBERG, H. F. et al. (1981): KdT-Empfehlung zur Ermittlung der Grundwasserneubildung. - Zentrales Geologisches Institut - WTI-Sonderheft 5/81; Berlin.
- DIN 4049: Hydrologie
Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie (1994)
Teil 5: Begriffe, unterirdisches Wasser (1990)
- DYCK, S. et al. (1978): Angewandte Hydrologie, Teil 2, Berlin
- GABRIEL, B. & H. JACOBS (1982): Methodik zur Überarbeitung der Abflusskarten zum N-A-U-Kartenwerk für den Festgesteinsbereich der DDR im Maßstab 1: 200 000, F/E-Stufe A1, Institut für Wasserwirtschaft, Berlin (unveröff. Bericht)
- GABRIEL, B.; JACOBS, H. & ZIEGLER, G. (1984): Methodik und Anwenderinstruktion zur Grundwasserdargebotsermittlung im Festgesteinsbereich unter Einbeziehung des Systemverhaltens der Einzugsgebiete, F/E-Stufe A4, Institut für Wasserwirtschaft, Berlin (unveröff.)
- GABRIEL, B. ZIEGLER, G & JACOBS, H. (1986): Das Festgesteinsmodell GEOFEMLAW als Grundlage für die neue Methodik der Grundwasserneubildungsberechnung im Festgesteinsbereich, Wasserwirtschaft-Wassertechnik 36, H.2, S.33-36, Berlin
- GABRIEL, B.; ZIEGLER, G & JACOBS, H. (1986): Ein neues Verfahren zur Berechnung von Gebietsniederschlägen im Mittelgebirgsbereich, Wasserwirtschaft-Wassertechnik 36, H.8, S.183-185, Berlin
- GABRIEL, B. & G. ZIEGLER (1989): Lithofazieseinheiten - ein neues Konzept zur Berechnung der Grundwasserneubildung im Festgesteinsbereich, Wasserwirtschaft-Wassertechnik 39, H.7, S.163-165, Berlin
- GABRIEL, B. & ZIEGLER, G. (1993): Zur GWN-Berechnung für Festgesteinsgrundwasserleiter auf der Grundlage des Modells GEOFEMLAW und seiner Weiterentwicklungen, Kolloquium Hydrogeologie Thema: Grundwasserneubildung, Vorträge, S.38 –56, HGN Hydrogeologie GmbH und KDT-GWT Thüringen, Erfurt, Hrsg.: HGN Hydrogeologie GmbH, Nordhausen
- GABRIEL, B. & JACOBS, H. (2000): GEOFEM LIGHT'98 - Informationssystem zur Wasserhaushaltsberechnung in Thüringen, CD-ROM, Stand 2000, TLU/ Fritz + Frölich Umweltsysteme GmbH (2000)
- GABRIEL, B. & ZIEGLER, G. (2003): GEOFEM – gestern, heute und morgen.- in: Unterlagen zum Workshop Grundwasserneubildung am 23.09.2003 in Nordhausen, Hrsg.: HGN Hydrogeologie GmbH Nordhausen
- GLUGLA, G.; R. ENDERLEIN & A. EYRICH (1979, 1981): Das Rechenprogramm RASTER zur Berechnung langjähriger Mittelwerte der Grundwasserneubildung und des Wasserhaushalts für den Lockergesteinsbereich der DDR - Teil 1 und 2, Institut für Wasserwirtschaft, Berlin

- GABRIEL, B. & HEINZ, A. (2003): HANDBUCH GEOFEM²⁰⁰³ (in Vorbereitung)
- GOLF, W. (1982): Berechnung mittlerer Monatsbilanzen des Wasserhaushalts im Mittelgebirge, Wasserwirtschaft-Wassertechnik 32, H.6, Berlin
- HÖLTING, B. (1980,1992) : Hydrogeologie.- 4. Aufl., Stuttgart
- JACOBS, H. ET AL. (1985): Analyse zur Erhöhung des räumlichen Auflösungsvermögens für Wasserbilanzen in Flussgebieten des Festgesteinsbereichs und ihre Dokumentation in Kartenunterlagen, NVe 8/83, Institut für Wasserwirtschaft, Berlin (unveröff. Bericht)
- KILLE, K. (1970): Das Verfahren MoMnQ, ein Beitrag zur Berechnung der mittleren langjährigen Grundwasserneubildung mit Hilfe der monatlichen Niedrigwasserabflüsse.- Z.Dtsch.Geol.Ges., Sonderh. Hydrogeol., S. 89-95; Hannover
- KRAFT, E. & D. SCHRÄBER (1982): Grundwasserspendenschlüssel und ihre Anwendung bei der Ermittlung des Grundwasserdargebots in Festgesteinsgrundwasserleitern, Z. angew. Geologie 28, H.4
- LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (2001): Grenzüberschreitender Schutz der Heil- und Mineralquellen im Vogtland in Sachsen und Westböhmen – Fachstellungnahme.- LfUG Dresden, Referat Grundwasser, Altlasten (unveröff.)
- RICHTER, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers, Berichte des Deutschen Wetterdienstes, H.194, Offenbach
- THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR UMWELT (1994): Hinweise zum Programm GEOFEM. -TLU, Abt. Wasserwirtschaft, Ref. Grundwasser; Jena
- VOßBERG, M., LEIBENATH, C., DAFFNER, T. (2003): Grenzüberschreitender Schutz der Heil- und Mineralquellen im Vogtland in Sachsen und Westböhmen. Teilbericht Wasserhaushalt. – UBV; Weischlitz (unveröff.).
- MIBLING, K. & DVORAK, J. (2002): Grenzüberschreitender Schutz der Heil- und Mineralquellen im Vogtland in Sachsen und Westböhmen. Teilbericht Geologie. – UBV; Weischlitz (unveröff.).
- VOßBERG, M., GABRIEL, B., ZWEIG, M. (2002): Erfahrungen bei der Anwendung von GEOFEM bei der Ermittlung wasserhaushaltlicher Größen im Festgestein am Beispiel der obervogtländischen Region.- in: Tagungsband zur Fachtagung „Schutz von Boden und Grundwasser“ am 01.08.2002 in Plauen