

Am Puls der schönen Lau – zur Hydrogeologie des Blautopf-Einzugsgebietes

Matthias Selg und Kerstin Schwarz

Zusammenfassung

Der Blautopf ist Vorflut für ein ca. 160 km² großes Einzugsgebiet in den oberjurassischen Karbonaten der Schwäbischen Alb. Er ist der Endpunkt eines spektakulären Höhlensystems mit dem Schüttungsverhalten einer typischen Karstquelle. Die größte Längserstreckung des Einzugsgebiets beträgt ca. 20 km. Markierungsversuche zeigen, dass hydraulisch hoch durchlässige Karststrukturen auch bis in diese entlegenen Gebiete reichen und eine entsprechend effektive Dränfunktion ausüben. Daneben besteht ein übergeordnetes Speichersystem aus Klüften und diagenetischer Porosität, dem so genannten Lochfels. Eine Fülle von Daten zeigt, dass hier langfristig Grundwasser gespeichert wird. Die offensichtliche Übereinstimmung von Ganglinien der Grundwasserneubildung und des Abflusses werden nicht durch einen raschen Abfluss der Neubildung verursacht. Vielmehr wird Grundwasser aus dem Speicher mobilisiert und über das Dränsystem des Karsts zum Abfluss gebracht. Dieser druckgesteuerte Piston flow Effekt ist die eigentliche Ursache für die karsttypisch rasche Reaktion der Quelle auf die Neubildung. Die Sickerwasserzone ist ungewöhnlich mächtig und sie ist doppelt so mächtig wie die gesättigte Zone. Allein ihr Volumen ist geeignet, relevante Mengen an Wasser zu speichern. Eine Reihe von Hinweisen macht deutlich, dass sie einen wichtigen Bestandteil des Speichervermögens darstellt.

1 Einleitung

Mit einer mittleren Schüttung von mehr als 2 m³/s, die ausschließlich aus der Grundwasserneubildung durch die lokalen Niederschläge im Einzugsgebiet resultiert, nimmt der Blautopf eine herausragende Stellung unter den Quellen der Schwäbischen Alb ein. Hinzu kommt, dass sein Einzugsgebiet auf Grund zahlreicher Markierungsversuche sehr gut eingegrenzt werden kann. Der hydrogeologische Bau ist zudem ausgesprochen einfach. Der Vergleich von Grundwasserneubildung und Abfluss zeigt, dass der Blautopf offenbar einzige bedeutende Vorflut dieses Einzugsgebiets ist, mithin in gewissem Sinn ein Natur-Lysimeter darstellt.

Der Quellaustritt des Blautopfes liegt am Rande einer Talschlinge im klüftigen und verkarsteten Oberjura. Er ist gleichzeitig das Ende eines Höhlensystems, das nach heutigem Kenntnisstand mit der erosiven Eintiefung der Donau in die Schwäbische Alb entstanden ist. Die Donau, als regionale Vorflut, die bis ins Mittel-Riß das Tal durchflossen hat, förderte die Entwicklung des Karstsystems durch Tieferlegung des Entwässerungsniveaus somit seit dem späten Miozän und vor allem im Pleistozän.

Das Talniveau lag im Mittel-Riß ca. 35 m tiefer als heute (VILLINGER 1987). Die Akkumulation einer entsprechend mächtigen Talfüllung hat seitdem das Vorflutniveau angehoben und ist Ursache für die große

Anschrift der Verfasser: Dr. Matthias SELG, Regierungspräsidium Freiburg, Abt. 9 Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Albertstr. 5, 79104 Freiburg; Dipl. Geol. Kerstin SCHWARZ, Institut für Geowissenschaften Universität Tübingen, Sigwartstr. 10, 72074 Tübingen.

Tiefe des Quelltopfs (ca. 22 m, einige Meter können auf den Bau der Wehranlage durch Mönche des Klosters Blaubeuren zurückgeführt werden).

Die idyllische Lage des Quelltopfs, seine Tiefe und seine charakteristische blaue Farbe haben die Menschen schon früh fasziniert. Ebenso wie sein unruhiges Schüttungsverhalten, das bei Hochwasser drastisch ansteigt. Literarisch verewigt wurde der Blautopf von Eduard Mörike in der „Sage von der schönen Lau“, erschienen 1854 in Stuttgart. Beschreibungen und Deutungsversuche des Phänomens Blautopf reichen, soweit nachweisbar, zurück bis ins 15. Jahrhundert. Die aus heutiger Sicht moderne, wissenschaftliche Auseinandersetzung begann um 1900.

2 Forschungsgeschichte

Eine Übersicht zur älteren Literatur findet sich mit zahlreichen Zitaten in VILLINGER (1978). Mit der Arbeit von GRADMANN (1912) wurde die Grundlage für die noch heutige gültige Sichtweise bezüglich des zusammenhängenden Grundwasserkörpers im Oberjura der Schwäbischen Alb geschaffen. Im Jahr 1924 begannen die Abflussmessungen und kurze Zeit später erschien die erste hydrologische Arbeit zum Blautopf (SIHLER 1929). Alle wesentlichen Fragen wurden hier erstmals in einer Arbeit erörtert: Größe und Lage des Einzugsgebiets, Grundwasserneubildung und Wasserhaushalt allgemein, Verkarstung und ihre Genese, etc.

BINDER (1960) konnte bereits auf langjährige hydrologische Messreihen zurückgreifen und diese auswerten. Die Resultate weichen bemerkenswert wenig von den heutigen Daten ab. Dies spricht für die Qualität der damals bereits vorhandenen Berechnungsansätze. Die Handhabung der entsprechenden Datenmengen ohne die heute üblichen EDV-Werkzeuge ist bewundernswert. Mit einer Skizze des Einzugsgebiets, basierend auf den seinerzeit vorhandenen Markierungsversuchen, kam BINDER den heutigen Kenntnissen ebenfalls schon recht nahe.

Die Möglichkeit, das Alter eines Grundwassers zu bestimmen, wurde von GEYH &

GROSCOPF (1978) erstmalig auf Grundwasservorkommen im Oberjura der Schwäbischen Alb angewendet. Die Mittlere Verweilzeit (MVZ) konnte basierend auf Tritium-Analysen im Grundwasser, einer langjährigen Zeitreihe der Gehalte in den Niederschlägen (Input-Funktion), sowie der Anwendung eines geeigneten mathematischen Algorithmus für die Simulation des Grundwassertransports zur Vorflut, dem so genannten Exponentialmodell, berechnet werden. Für den Blautopf lagen diese um ca. 10 Jahre. Bereits damit wurde deutlich, wie sehr das Grundwasser von unterschiedlichen Komponenten geprägt wird. Längerfristig gespeicherte Anteile unterscheiden sich bezüglich ihrer Verweildauer im Untergrund drastisch von denen, die sich unter Ausnutzung der Karstzonen nur ausgesprochen kurz im Untergrund aufhalten (z.B. Direktabfluss).

Eine umfangreiche Arbeit von VILLINGER (1978) hat den damaligen Kenntnisstand zur Hydrogeologie des Blautopfs zusammengefasst. Die dort zu findende Zusammenstellung der Markierungsversuche ist heute nicht mehr aktuell. Die Wasserhaushaltsbetrachtungen sind durch die Fortschritte in der auf Geoinformationssysteme (GIS) gestützten hydrologischen Modellierung ebenfalls überholt. Des Weiteren sind neuere Daten zur Altersstruktur des Grundwassers hinzugekommen. Die vorliegende Arbeit soll daher eine Fortschreibung der Arbeit von VILLINGER darstellen. Bereiche, die nach wie vor Gültigkeit haben und dort nachgelesen werden können, werden hier daher nur kurz abgehandelt: Schichtfolge, Schichtlagerung, Tektonik und Verkarstung.

Anfang der 1980er-Jahre rückten Verunreinigungen des Grundwassers der Schwäbischen Alb mit Pflanzenschutzmitteln ins Blickfeld. Auch der Blautopf machte diesbezüglich keine Ausnahme (GISSL 1988, GISSL & HURLE 1984). Im Wesentlichen handelte es sich um Belastungen mit dem Wirkstoff Atrazin und seinem Abbauprodukt Desethylatrazin. Da trotz Anwendungsverbots die Gehalte im Grundwasser anhielten, wurden umfangreiche Untersuchungen an zahlreichen Quellen und Brunnen der Mittleren Schwäbischen Alb durchgeführt (BAUER et al 2002, BAUER & SELG 2006, SELG et al.

2005). Die Ergebnisse von GEYH & GROSCHOPF (1978) zur Alterstruktur und Mittleren Verweilzeit des Grundwassers wurden damit bestätigt und aufbauend auf einer breiteren Datenbasis und mit unterschiedlichen Ansätzen erweitert (vgl. Kap. 7). Somit untermauern die z. T. bis heute anhaltenden Gehalte des 1991 verbotenen Atrazins die entsprechend langen Mittleren Verweilzeiten.

Späleologie und Höhlentauchen blicken beim Blautopf ebenfalls auf eine lange Geschichte zurück. Sie sind wesentlicher Bestandteil und eine der wesentlichen Grundlagen geologischer und hydrogeologischer Forschung. Der erste Tauchversuch zum Höhleneingang erfolgte bereits 1957 (KELLER 1963). Die darauf folgenden spektakulären Tauchgänge von Jochen HASENMAYER und seine immer tieferen Vorstöße rückten den Blautopf und sein Höhlensystem in den Blickpunkt der Öffentlichkeit (HASENMAYER 1986). Seine Vorstellungen zu Alter und Genese des Karstsystems (HASENMAYER 1984) führten zu einer intensiven, aber auch kontroversen Diskussion unter Höhlenforschern und mit dem damaligen Geologischen Landesamt von Baden-Württemberg. Nicht weniger eindrucksvoll waren und sind seine späteren Tauchfahrten mit dem selbst konstruierten Tauchboot.

Mittlerweile ist mit der ARGE Blautopf eine Gruppe von Tauchern und Höhlenforschern aktiv. Das Ziel dieser Gruppe ist die wissenschaftliche Erforschung und Dokumentation der Blauhöhle (Höhlenplan, Geologie, Biologie, etc.). Sie konnten im Jahr 2008 erstmals 6 km weit in den trockenen Teil der Höhle vorstoßen. Hallen von unglaublicher Größe wurden entdeckt. Bereits 2006 gelang in Zusammenarbeit mit der ARGE Höhle & Karst Grabenstetten die Entdeckung einer Verbindung von Blauhöhle und Vetterhöhle. Bislang unerfüllt blieb der Wunsch, einen trockenen Zugang zum Höhlensystem zu finden, der die aufwändigen und gefährlichen Tauchgänge überflüssig machen würde.

3 Einzugsgebiet

3.1 Abgrenzung

Zahlreiche Markierungsversuche erlauben es, das Einzugsgebiet des Blautopfs mit großer Genauigkeit abzugrenzen. Von 21 Versuchen, die einen Tracer-Durchgang im Blautopf zur Folge hatten, zogen auch einige (8) Durchgänge an anderen Austrittsstellen nach sich. Die Eingabestellen lagen demnach im Grenzbereich des Einzugsge-

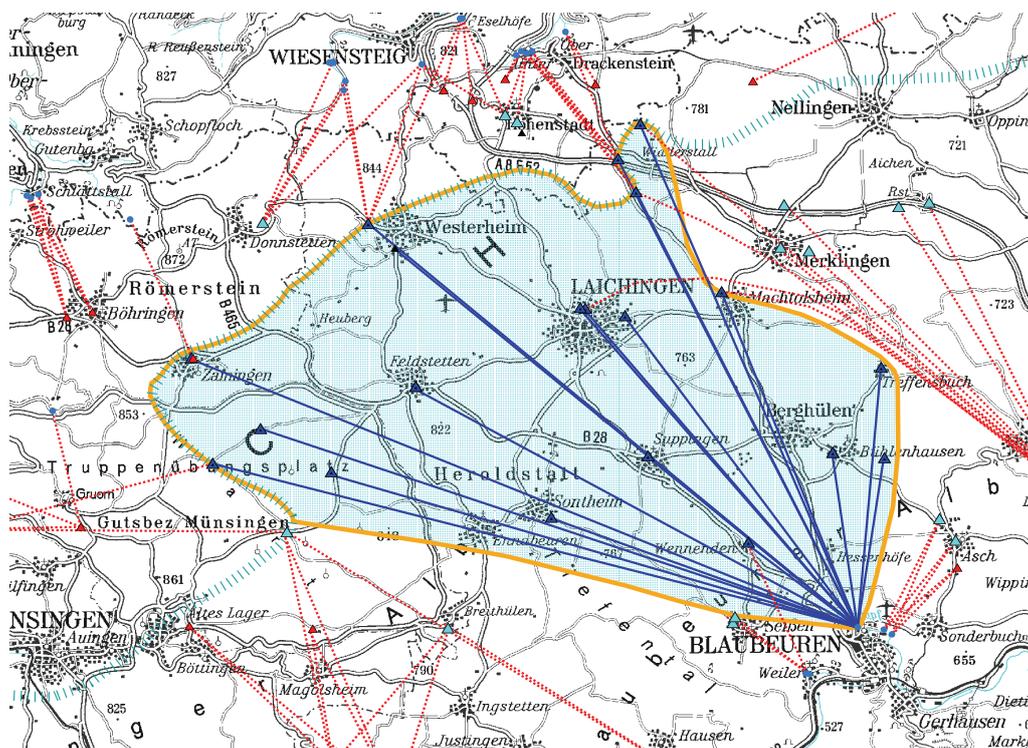


Abb. 1: Einzugsgebiet des Blautopfs, abgegrenzt anhand von Markierungsversuchen

Tab. 1: Zusammenstellung der Markierungsversuche im Umfeld des Blautopfs

Lfd Nr.	Eingabedatum	Eingabestelle				Austrittsstelle	Entfernung [km]	Tracermenge und -art	V _{max} [m/h]	V _{cmax} [m/h]
		Ort	Rechts	Hoch	Art					
1	25.10.1927	Treffensbuch	3558700	5371670	D	Blautopf	7,1	Löschwasser	≈ 100	
2	31.03.1952	Laichingen	3550910	5373280	Sch	Blautopf	11,3	5 kg Uranin	350	310
3	30.08.1957	Suppingen	3552560	5369250	D/A	Blautopf	7,2	5 kg Uranin	≈ 70	55
4	13.10.1958	Bühlenhausen	3557420	5369350	D/A	Blautopf	4,8	Fruchtsaft	≈ 100	
5	18.10.1958	Bühlenhausen	3557420	5369350	D/A	Blautopf	4,8	4,5 kg Uranin	110	100
6	24.02.1960	Machtolsheim	3554500	5373740	D/A	Blautopf	9,8		160	
						Kl. Lauterquelle QF Albgr. IV	10,8	5 kg Uranin	115	110
							10,7		115	110
7	14.05.1960	Sontheim	3550020	5367580	Ks/A	Blautopf	8,6	3 kg Uranin	120	55
8	21.04.1961	Feldstetten	3546450	5371150	D/A	Blautopf	13,4	10 kg Uranin	100	90
9	21.04.1961	Feldstetten	3546450	5371150	D/A	Blautopf	13,4	5 t Steinsalz	96	85
10	15.07.1969	Bühlenhausen	3558780	5369200	D	Blautopf	4,7	4,5 kg Uranin	90	75
11	02.06.1971	Seißen- Wennenden	3555200	5366900	D	Blautopf	3,7	5 kg Uranin	85	65
						Rathausquelle	4,0		(10)	(10)
12	12.04.1986	Münsingen Rübhu	3541110	5369050	D/akt	Blautopf	17,6	10 kg Uranin	163	146
						Ermsquelle	6,6		21	12
13	12.04.1986	Münsingen Endenau	3542370	5370000	D/akt	Blautopf	16,6	50 kg Na- Naphthionat	181	159
14	13.04.1986	Münsingen Bäumlersberg	3544230	5368820	D	Blautopf	14,5	20 kg Eosin	120	104
15	02.06.1986	Laichingen Klär- anlage	3551960	5373080	Sch	Blautopf	10,5	15 kg Pyranin	141	132
16	03.06.1986	Laichingen	3550780	5373300	Sch	Blautopf	11,4		157	133
						Br. 5 Lautern	14,0	5 kg Uranin	127	110
						Kl. Lauterquelle	13,9		253	135
17	05.05.1987	Westerheim, Wertlen	3545200	5375600	Sp	Blautopf	17,0		157	133
						Gießbachquelle	4,7		155	129
						Kl. Filsursprung	4,0	10 kg Uranin	50	41
						Gr. Filsursprung	3,7		49	44
						Todsburgquelle	6,1		119	104
						Kl. Lauterquelle	20,0		≈ 99	88

Lfd Nr.	Eingabedatum	Eingabestelle				Austrittsstelle	Entfernung [km]	Tracermenge und -art	V _{max} [m/h]	V _{cmax} [m/h]
		Ort	Rechts	Hoch	Art					
18	12.05.1987	Zainigen	3540550	5371930	D/akt	Blautopf	19,0	20 kg Eosin	147	128
19	12.03.1991	Widderstall	3552249	5376467	Bo	Blautopf Gosquelle W Gosquelle E Qu. im Gostal Krähensteigqu. W GWM B 55 Br. 4 Lautern Br. 5 Lautern	13,2 4,7 4,7 4,9 4,8 2,6 14,3 14,2	20 kg Eosin	71 24 24 24 22 (68) 71	63 20 20 8 19 (68) 64
20	12.03.1991	Widderstall	3552360	5378320	Pg	Blautopf Kl. Lauterquelle GWM B 55	14,9 15,2 2,2	40 kg Na-Naphtionat	67 68	62 61
21	14.03.1991	Widderstall	3551770	5377370	Pg	Blautopf Gosquelle Hirsch Gosquelle Mühle Quelle Gostal Krähensteigquelle	14,3 3,7 3,7 3,9 3,8	10 kg Uranin	(26) 106 105 95 64	(26) 78 77 75 53
22	06.12.1954	Merklingen	3556050	5374950	D/A	Kl. Lauterquelle Quellf. Albgr. IV	10,2 10,0	5 t Steinsalz	75 75	70 65
23	06.12.1954	Seißen	3554800	5364700	D/A	Rathausquelle	2,2	2 kg Uranin	≈ 25	≈ 22
24	06.08.1957	Asch	3560650	5366950	D	Gieselbachquelle Riedquelle	3,1 3,1	5 kg Uranin	80 85	70 75
25	19.04.1963	Merklingen	3556800	5374850	Sbr	Kl. Lauterquelle	9,6	5 t Steinsalz	115	100
26	30.04.1965	Münsingen Ernstfeld	3543060	5367180	D	Urspringtopf Schmiechquelle Ermsquelle Siebenbrunnen	12,0 6,4 8,3 8,2	10 kg Uranin	480 290 110 180	400 178 48 31
27	10.06.1965	Breithülen	3547300	5364550	D/A	Urspringtopf Schwarzweiherqu. Schmiechquelle	7,1 5,0 4,8	10,6 kg Uranin	620 140 80	590 45 70
28	07.07.1965	Seißen	3554850	5364860	D	Rathausquelle	2,7	5 kg Uranin	90	70

Lfd Nr.	Eingabedatum	Eingabestelle				Austrittsstelle	Entfernung [km]	Tracermenge und -art	V _{max} [m/h]	V _{cmax} [m/h]
		Ort	Rechts	Hoch	Art					
29	09.05.1966	Hohenstadt	3548800	5378570	Hüle	Gosquelle Hirsch Gosquelle Mühle Todsburgquelle Gießbachquelle	1,8 1,9 2,9 2,9	10 kg Uranin	(45) (46) 135 (70)	(45) (46) 118 (70)
30	08.05.1967	Hohenstadt	3549120	5378380	Pg	Gosquelle Hirsch	1,9	10 kg Uranin	28	4
31	23.06.1969	Asch	3560230	5367540	D	Gieselbachquelle Riedquelle	3,4 3,4	5 kg Uranin	125 170	115 150
32	25.10.1973	Neilingen-Aichen	3559160	5376060	Bo	Kl. Lauterquelle Br. 5, Albgr. IV	9,1 9,8	5 kg Uranin	54 52	52 45
33	05.05.1987	Donnstetten Tiefental	3542430	5375630	D/akt	Gießbachquelle Gr. Filsursprung Br. 1 Papiermühle Kl. Filsursprung	6,0 4,2 5,0 4,4	40 kg Na-Naphthionat	260 239 ≈ 217 221	245 193 114 204
34	11.11.1999	Laichingen	3556144	5376114	Pg	Kl. Lauterquelle Br. 4 Lautern Br. 5 Lautern Tbr. Lautertal	10,9 11,2 11,0 12,7	5 kg Uranin	146 128 135 67	132 104 103 38
35	11.11.1999	Neilingen-Aichen	3559956	5376180	Pg	Kl. Lauterquelle Br. 4 Lautern Br. 5 Lautern Tbr. Lautertal	9,3 9,5 9,4 10,9	10 kg Eosin	(524) 113 119 (33)	115 91 89 (33)
36	1907	Auingen Altes Lager	3540200	5363300	A	Schmiechquelle	4,6	Uranin	40	
37	1924	Asch	3560700	5366200	?	Gieselbachquelle Riedquelle	2,5 2,5	Uranin	sichtbar sichtbar	
38	vor 1933	Zainingen	3540600	5371920	D	Obere Quellen im Donntal	4,8	Uranin	≈ 100	
39	29.09.1954	Temmenhausen	3563820	5372560	D/A	Kalter Brunnen	5,0	Phenol (Teer)	≈ 55	
40	07.10.1954	Temmenhausen	3563820	5372560	D/A	Kalter Brunnen	5,0	1 kg Uranin	≈ 60	

Lfd Nr.	Eingabedatum	Eingabestelle				Austrittsstelle	Entfernung [km]	Tracermenge und -art	V _{max} [m/h]	V _{cmax} [m/h]
		Ort	Rechts	Hoch	Art					
41	22.12.1954	Bollingen	3567200	5369000	?	Weierbachquelle	2,8	Uranin		70
42	25.11.1957	Nellingen	3558500	5378500	A	Lonequelle	7,7	5 kg Uranin	23	22
43	06.05.1959	Nellingen	3558560	5378800	D	Lonequelle	7,5	3 kg Uranin	100	85
44	31.03.1960	Türkheim	3559450	5383450	D/akt	Rohrachquelle Rohrachnebenqu. Rohrach Aufb. WIFO-Brunnen Galgenbrunnenqu. TB6 Geisingen TB3 Geisingen? Springequelle?	4,0 4,2 3,6 3,7 3,2 3,6 3,2 4,9	6 kg Uranin	53 ≈ 45 ≈ 38 ≈ 29 47	43 15
45	18.10.1960	Justingen	3549200	5361600	Sbr.	Achquelle Urspringtopf ?	4,2	5 t Steinsalz	30	19
46	15.09.1961	Mehrstetten	3542060	5360040	Sch	Sondernachqu.	3,9	5 kg Uranin	20	19
47	08.03.1962	Böhringen	3537950	5373180	Sch	Schw. Lauterqu. Goldloch Verf. Goldloch	3,6 3,5 3,5	2,5 kg Uranin	104 98 86	81 82 79
48	14.08.1962	Radelstetten	3563700	5376720	D/akt	Lonequelle Tbr. Lonsee	3,6 3,8	5 kg Uranin	28 29	21 22
49	13.08.1962	Nellingen	3558520	5378550	A	Lonequelle Tbr. Lonsee	7,7 8,0	2,5 t Steinsalz	35 35	31 30
50	16.10.1963	Münsingen	3537640	5367320	D	Ermsquelle Siebenbrunnen Qu. im Katzental	2,9 2,9 3,2	5 kg Uranin		
51	20.02.1964	Böhringen	3537270	5373040	D/A	Schw. Lauterqu. Goldloch QF Schlattstall Schrecke-Seltenb. Verf. Goldloch	3,5 3,5 3,6 3,5 3,4	2,5 kg Uranin	(28) (77) (97) (97) 78	(28) 74 (97) (97) 64
52	15.04.1965	Dutzenberg-schacht	3555320	5379490	Sch	Rohrachquelle Rohrachnebenqu. Rötelbachquelle Lonequelle?	9,3 9,7 5,4 10,7	5 kg Uranin	201 (177) (129) (138)	179 (177) (129) (138)

Lfd Nr.	Eingabedatum	Eingabestelle					Austrittsstelle	Entfernung [km]	Tracermenge und -art	V _{max} [m/h]	V _{cmax} [m/h]
		Ort	Rechts	Hoch	Art	Art					
53	12.12.1972	Münsingen Bahnhöfle	3540500	5364610	D	Schmiechquelle Schwarzweherqu	5,3 7,2	10 kg Uranin	250 200	200 145	
54	02.05.1973	Münsingen Roßstelle	3543740	5364530	D	Schwarzweherqu. Schmiechquelle	5,1 3,7	10 kg Uranin	245 95	205 90	
55	22.10.1974	Müllplatz Kohl	3538220	5362750	Oberfl.	Schmiechquelle	6,1	15 kg Uranin	15	14	
56	03.08.1976	Hohenstadt	3547940	5378975	D	Schwarzweherqu.	7,9	3 kg Uranin	18	17	
57	26.06.1980	Drackenstein	3551180	5379400	D	Todsburgquelle	2,2	3 kg Uranin	82	62	
58	05.05.1987	Lämmerbuckel	3547185	5379240	D	Krähensteigquelle	1,6	4 kg Eosin	(13,3)	(13,3)	
59	05.05.1987	Lämmerbuckel	3547185	5379240	Ks	Gießbachquelle Todsburgquelle	1,2 2,0	4,5 kg Bärlappsp.	(52) (90)	(52) (90)	
60	23.04.1988	Steinbruch Staudenmaier	3548800	5379550	Bo	Gießbachquelle Quelle Gostal Imferlochquelle	1,2 0,7 0,6	50 kg LiCl 1,5 kg Uranin	(76) (62) 32	(76) (62) 25	
61	28.06.1954	Westerheim	3545900	5374910	D	kein Austritt		5 t Steinsalz			
62	14.08.1962	Oppingen	3561360	5378500	A	kein Austritt		2 kg Eosin 5 kg LiCl			
63	19.04.1963	Scharenstetten	3562950	5375030	D/akt	kein Austritt		5 kg Uranin			
64	04.12.1969	Scharenstetten	3563700	5375040	D/akt	kein Austritt		10 kg Uranin			
65	08.04.1973	Hohenstadt	3549240	5378070	Bo	kein Austritt		5 kg Uranin			
66	11.11.1999	Temmenhausen	3563140	5372814	Bo	kein Austritt		60 kg Na-Naphtionat			
67	15.05.2000	Temmenhausen	3563130	5372840	Bo	kein Austritt		10 kg Eosin			
68	15.05.2000	Dornstadt-Tomerdingen	3566150	5371120	D	kein Austritt		92 kg Na-Naphtionat			
69	15.05.2000	Dornstadt, Schammmental	3569580	5368450	Ks	kein Austritt		3 kg Uranin			

Zu Tabelle 1:

Blau: Blautopf mit Farbdurchgang,
hellgrün: Blautopf wurde beobachtet, blieb aber ohne Farbdurchgang,
gelb: Blautopf wurde **nicht** beobachtet;

Werte in Klammer: wenig brauchbar, z. B. erster Nachweis brachte die höchste Konzentration, d. h. die Beobachtung setzte zu spät ein oder war nicht häufig genug. Damit sind maximale und dominierende Abstandsgeschwindigkeit rechnerisch gleich und nur unzureichend bestimmt. Austrittsstelle mit ? : Nachweis unsicher, da nur Einzelwerte im Spurenbereich.

Art der Eingabe:

A: Abwasserversickerung,
Bo.: Bohrung,
D: Doline,
D/A: Doline mit Abwasserversickerung,
D/akt.: Doline mit aktiver Versickerung,
Ks/A: Karstspalte mit Abwasserversickerung,
Pg.: Probegrube,
Sbr: Schachtbrunnen,
Sch: Schacht

Die Zusammenstellung erfolgte nach SIHLER (1929), EISSELE (1957), GROSCHOPF (1957, 1966), BINDER (1960), VILLINGER (1978), VILLINGER & UFRICHT (1989) bzw. den dort genannten Literaturhinweisen sowie unveröffentlichten Unterlagen des LGRB.

biets. Bei weiteren 14 Versuchen wurde der Blautopf beobachtet, blieb aber ohne Wiederaustritt des Tracers. Insgesamt stehen damit 35 aussagekräftige Versuche zur Verfügung, um das Einzugsgebiet abzugrenzen (Abb. 1). Die Fläche beträgt nach dieser Abgrenzung etwa 160 km².

Zusätzlich sind 21 Versuche aus der näheren und weiteren Umgebung des Blautopf-Einzugsgebiets bekannt, bei denen der Blautopf aber nicht als Beobachtungsstelle genutzt wurde. Sie können daher für die Abgrenzung nicht heran gezogen werden. Ferner gibt es 10 Versuche, die vollkommen ohne Austritt blieben. Alle Markierungsversuche sind in Tab. 1 zusammengestellt.

Das Einzugsgebiet beginnt an der kontinentalen Grundwasserscheide unweit des Albtalraums bei Zainingen und reicht bis kurz vor die Donau als der Hauptvorflut. Es überspannt damit nahezu einen vollständigen Querschnitt durch das oberflächennahe Aquifersystem des Oberjura auf der Schwäbischen Alb. Möglicherweise überschneidet sich das Einzugsgebiet nordöstlich von Laichingen mit dem der Kleinen Lauterquelle. Markierungsversuche weisen zumindest darauf hin (Nr. 16, 19 und 20 in Tab. 1).

3.2 Hydrogeologischer Bau

Das Einzugsgebiet des Blautopfs wird von der Schichtfolge des Oberjura geprägt. Lediglich in Seißen steht ein kleiner Erosionsrest der Unteren Süßwassermolasse an (vgl. GK25, Bl. 7524 Blaubeuren). Wegen seiner geringen Ausdehnung und Mächtigkeit kann diese Überdeckung vernachlässigt werden.

Die basale Einheit des Oberjura, die Impressamergel, bilden nach allgemeiner Auffassung die Sohlenschicht des darüber folgenden Grundwasserleiters. Dieser beginnt somit mit den Wohlgeschichteten Kalken, die von den Lacunosamergeln überlagert werden. Nach Auffassung von VILLINGER (1978) übernehmen mit zunehmender Überlagerung die Lacunosamergel die Funktion des Grundwasserstauers, so auch in der unmittelbaren Umgebung des Blautopfs. Während die bislang genannten Schichten

in gebankter Fazies ausgebildet sind, liegen die darüber folgenden Unteren und Oberen Felsenkalke des Kimmeridge überwiegend als Massenkalk vor. Teile dieser Massenkalken sind wiederum diagenetisch stark überprägt. Dolomitisierung und Dedolomitisierung haben die so genannte Lochfelsfazies geschaffen, die mit einiger Wahrscheinlichkeit eine hydrogeologisch bedeutende Rolle spielt (STOBER 1984, KAPPES et al. 2007, SELG 2008).

Liegende Bankkalke finden sich vor allem im südlichen Teil des Einzugsgebiets zum großen Teil als Massenkalk. Nur geringe Verbreitung haben die jüngsten, weitgehend gebankten Schichtglieder (Zementmergel, Hangende Bankkalke). Zum einen, da sie nicht überall abgelagert worden sind oder da sie bereits wieder abgetragen wurden. Einen Längsschnitt durch das Einzugsgebiet des Blautopfs und damit den hydrogeologischen Bau zeigt Abb. 2.

Ein reiches Inventar an Dolinen, Trockentälern und 50 bekannten Höhlen sind Ausdruck der Verkarstung, die den Oberjura bis hinunter zu den Wohlgeschichteten Kalken erfasst hat. Auch die Lacunosamergel können in diesem Gebiet als verkarstungsfähig betrachtet werden, da ihr Kalkgehalt hierfür im Allgemeinen ausreichend hoch ist (>70 %). Somit kann ihre von VILLINGER (1978) bereichsweise postulierte Rolle als Sohlenschicht auch angezweifelt werden. Insgesamt ist das Ausmaß der Grundwasserzirkulation in größerer Tiefe unterhalb des Vorflutniveaus generell wenig bekannt. Wegen fehlender Oberflächengewässer sind keine Flussversickerungen vorhanden.

Der hydrogeologische Bau stellt sich demnach als sehr einfach und klar umgrenzt dar. Das Schichteinfallen ist mit ca. 1° nach SE gerichtet und damit ausgesprochen flach. Störungen sind selten und haben nur geringe Versatzbeträge. Nach VILLINGER (1972, 1977) gehört das gesamte Einzugsgebiet in die Offene Zone des Tiefen Karst.

3.3 Grundwasseroberfläche

VILLINGER (1977) hat einen Grundwasser- gleichenplan für den Oberjura auf der

Schwäbischen Alb und im Molassebecken vorgelegt, der bis heute in allen wesentlichen Punkten Bestand hat. Dies ist nicht unbedingt selbstverständlich, da in weiten Teilen der Albhochfläche Grundwasser-Messstellen als Stützpunkte fehlen. Der

Gleichenplan basiert wesentlich auf den Höhen der Vorfluter und den mit Markierungsversuchen festgestellten Abflussrichtungen. Die praktische Erfahrung mit diesem Plan hat immer wieder seine Zuverlässigkeit bewiesen.

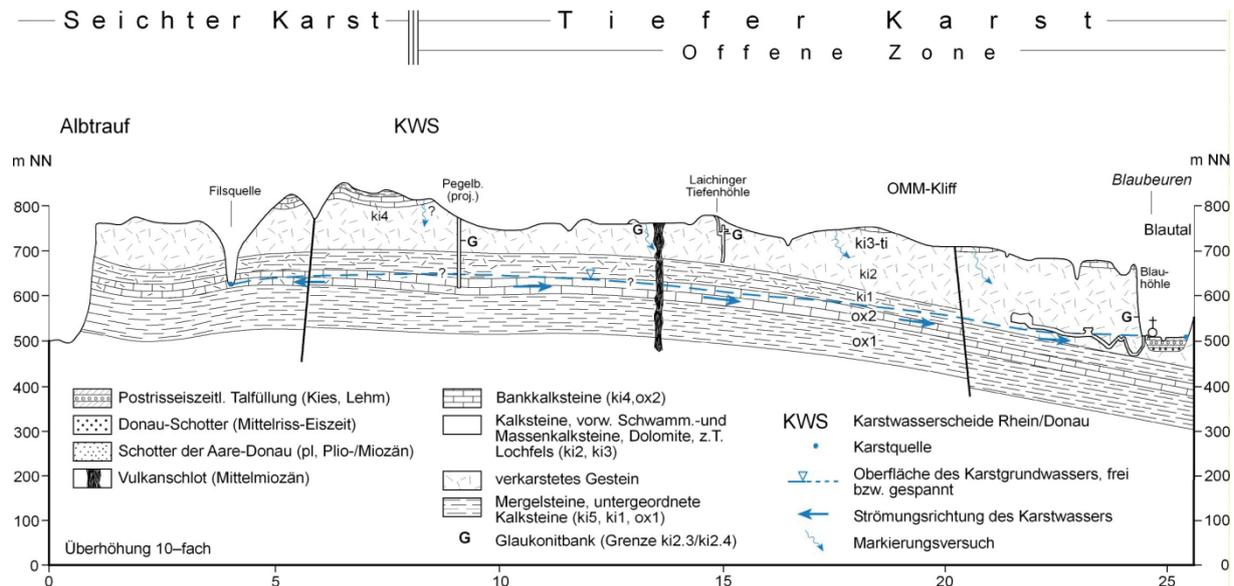


Abb. 2: Hydrogeologischer Schnitt durch das Einzugsgebiet des Blautopfs (verändert und ergänzt nach VILLINGER 1987). Sohlschicht des Oberjura-Aquifers sind die Impressamergel (ox1).

Im Einzugsgebiet des Blautopfs gibt es nur drei Grundwassermessstellen. Diejenigen in Ennabeuren und Westerheim sind nicht tief genug und haben die Grundwasseroberfläche nicht erreicht, sondern erfassen lediglich Sickerwasser. Eine dritte Messstelle bei Laichingen hat den Grundwasserleiter vollständig durchörtert, blieb aber ohne Grundwasseranschluss. Die dort anzutreffenden geringen Wassermengen sind Sickerwasser aus der nahe gelegenen Altlast. Eine einzige funktionsfähige Messstelle, gebaut im Rahmen der Planungen für die Schnellbahntrasse Stuttgart – München, liegt genau am Rand des Einzugsgebiets. Sie diente beim Markierungsversuch mit der lfd. Nr. 19 in Tab. 1 als Eingabestelle.

Aus den genannten Gründen wird aber auch der Grundwassergleichenplan im Einzugsgebiet des Blautopfs als belastbar eingestuft. Wie schon im hydrogeologischen Längsschnitt ersichtlich (Abb. 2), ist die ungesättigte Zone deutlich mächtiger als die gesättigte. Mittels GIS wurde die Grund-

wasseroberfläche sowohl mit einer Aquiferbasiskarte als auch mit einem digitalen Geländemodell verschnitten. Damit lassen sich flächenhaft Aquifermächtigkeit und Flurabstand ermitteln. Im Mittel liegt die Grundwassermächtigkeit bei 65 m, die Mächtigkeit der ungesättigten Zone bei 130 m.

Im Einzugsgebiet gibt es rund 50 Höhlen, von denen ein paar das Potenzial aufweisen, eine (befahrbare) trockene Verbindung zum Blauhöhlensystem zu besitzen. Zu diesen gehört allen voran der RÜB-Schacht bei Laichingen. Er reicht an der tiefsten Stelle auf ca. 655 m ü. NN hinunter und liegt somit dem Karstwasserspiegel am nächsten. An der Hessenhau-Doline wird seit 2006 ein Schacht ausgehoben, um von dort aus auf die Gänge der Blauhöhle zu stoßen, wie es bereits mit der Vetterhöhle möglich war. Mittlerweile ist eine Tiefe von 53 m erreicht und ein Luftzug deutet auf eine Verbindung hin.

4 Grundwasserneubildung

Methodische Konzepte zur Ermittlung der Grundwasserneubildung sind in der Hydrologie lange etabliert. Seit einigen Jahren bieten rechnergestützte Anwendungen, insbesondere der Einsatz von GIS-Produkten, die Möglichkeit räumlich und zeitlich hoch auflösender Umsetzung dieser Konzepte. Für das Land Baden-Württemberg wurde von ARMBRUSTER (2002) eine hydrologische Modellierung für den Zeitraum 1961–1990 durchgeführt (mittlerweile aktualisiert bis 2001). Die räumliche Diskretisierung erfolgte dabei in einem 500 x 500 m² Raster, die zeitliche Auflösung betrug 1 Tag.

Aus dieser Modellierung können die Daten für das Einzugsgebiet des Blautopfs extrahiert werden. Demzufolge beträgt die Grundwasserneubildung im langjährigen Mittel 545 mm/a. Die Spannbreite liegt dabei zwischen 340 mm/a in einem typischen Trockenjahr (1971) und 931 mm/a in einem nassen Jahr (1965).

Ein Vergleich der Grundwasserneubildung mit den Abflussdaten zeigt, dass die Modellierung die Neubildung möglicherweise um ca. 13 % überschätzt (ARMBRUSTER & SELG 2006). Alternativ könnte ein zusätzlicher Abstrom, beispielsweise zur Kleinen Lauterquelle, in Frage kommen (vgl. Kap. 3.2). Auf Basis der Abflussdaten beträgt die Grundwasserneubildung 470 mm/a. Insgesamt ergeben beide voneinander unabhängigen Methoden eine gute Übereinstimmung, da in beiden Fällen Unschärfen nicht vermieden werden können.

5 Schüttungsverhalten

Seit Oktober 1924 wird der Abfluss des Blautopfs gemessen. Die Messmethodik, und damit die Genauigkeit der Daten, wurde mit der Zeit immer mehr verfeinert. Die zunächst nur tägliche Ablesung des Lattenpegels ist bei dem karsttypisch nervösen Schüttungsgang (s. u.) nicht optimal. Ab 1978 erfolgte die Messung als kontinuierliche Aufzeichnung mittels schwimmergesteuertem Schreiber und Papierrolle. Im Zeitraum 1994/95 erfolgte die Umstellung auf einen Druckluftpegel und automatische

Datenübertragung. Ein grundsätzliches Problem bestand dabei in der großen Breite der Messschwelle. Das führt bei Niedrigwasser zu größeren Fehlern, da hier der Fehler bei der Messung des Wasserstandes überproportional groß werden und sich entsprechend in der W-Q-Beziehung auswirken kann.

Seit August 2005 besteht ein vollkommen anderes Messverfahren. Ein Pegel (Messprinzip: Drucksonde) misst den Abfluss der Schelklinger Ach vor der Einmündung in die Blau, ein weiterer Pegel (Messprinzip: Ultraschall) den Abfluss nach der Einmündung. Die Differenz entspricht der Blautopfschüttung. Diese Schüttung kann wiederum mit der Abflusshöhe am Wehr korreliert werden, die mittels Drucksonde gemessen wird.

Digital verfügbar, d. h. gespeichert in einer Datenbank der LUBW, sind die Wasserstände seit 1. März 1937 und zusätzlich die Abflussdaten seit 1. November 1952.

Das Schüttungsverhalten des Blautopfs ist das einer typischen Karstquelle, er reagiert rasch auf Niederschlagsereignisse. Die Schüttungsschwankungen sind sehr ausgeprägt und Schüttungsereignisse gehen mit starker Eintrübung einher (Abb. 3 und 4). Für den Zeitraum 1951–2007 gelten die folgenden hydrologischen Hauptzahlen:

$$NQ = 0,251 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$MQ = 2,330 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$HQ = 32,700 \text{ m}^3/\text{s}$$

Modellierte Neubildung und gemessener Abfluss lassen eine zeitliche Differenz erkennen, die als Mittlere Reaktionszeit bezeichnet wird und im Fall des Blautopfs 2 Tage beträgt. Diese wurde ermittelt, indem durch tageweises Verschieben der beiden Zeitreihen gegeneinander die jeweiligen Korrelationskoeffizienten berechnet wurden. Mit einem Verschieben von 2 Tagen konnte der Korrelationskoeffizient mit $r = 0,79$ optimiert werden (ARMBRUSTER & SELG 2006).

Bei der Reaktion, mit der die Quelle auf den Eintrag von neuem Grundwasser in die gesättigte Zone des Einzugsgebiets reagiert,

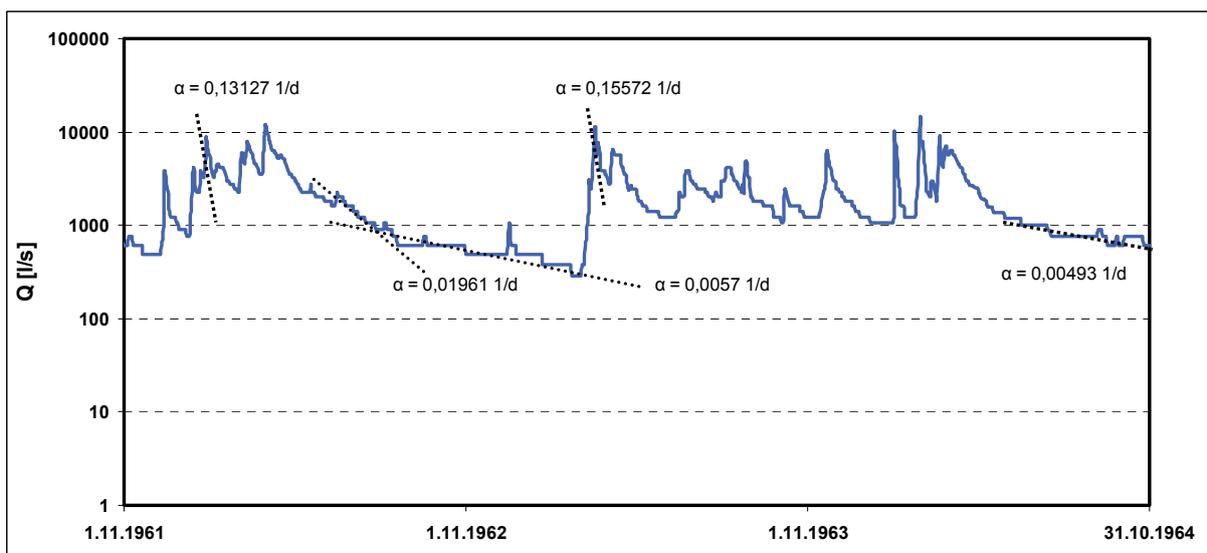
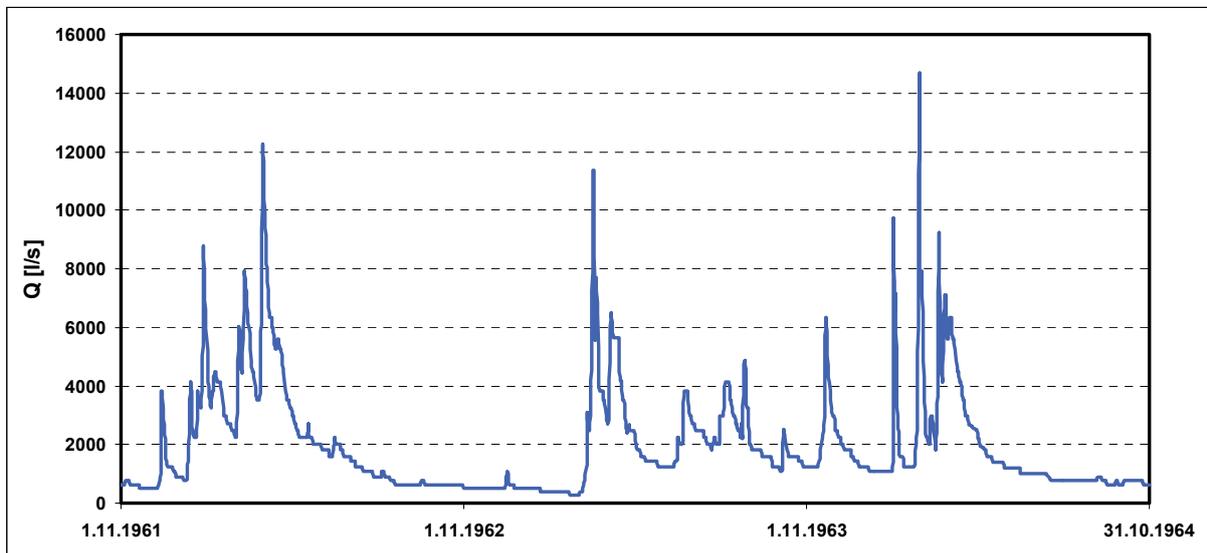
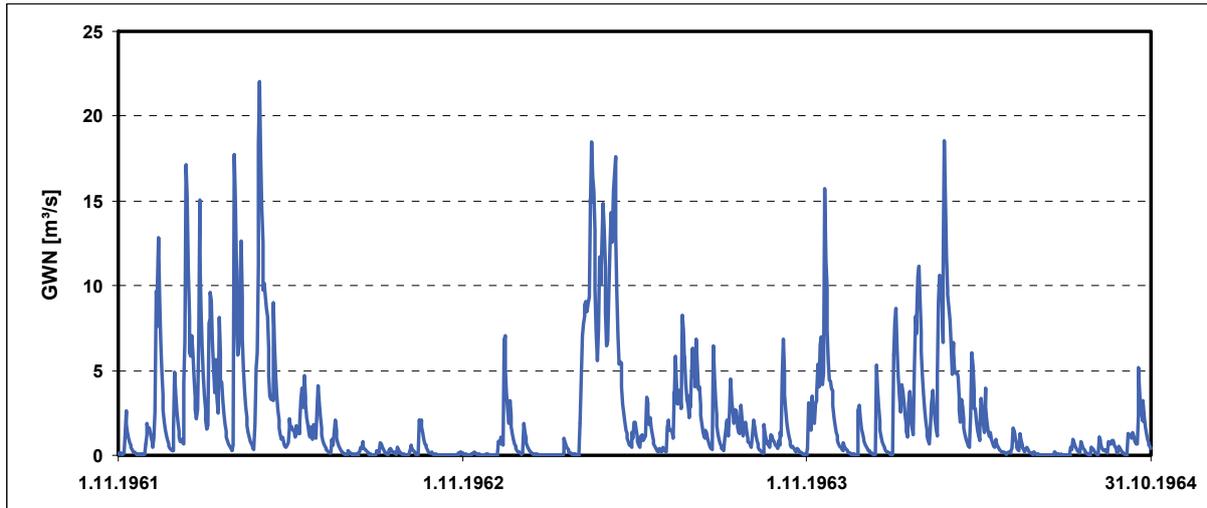


Abb. 3: Grundwasserneubildung im Einzugsgebiet des Blautopfs und Abflussganglinie (SELG 2008).

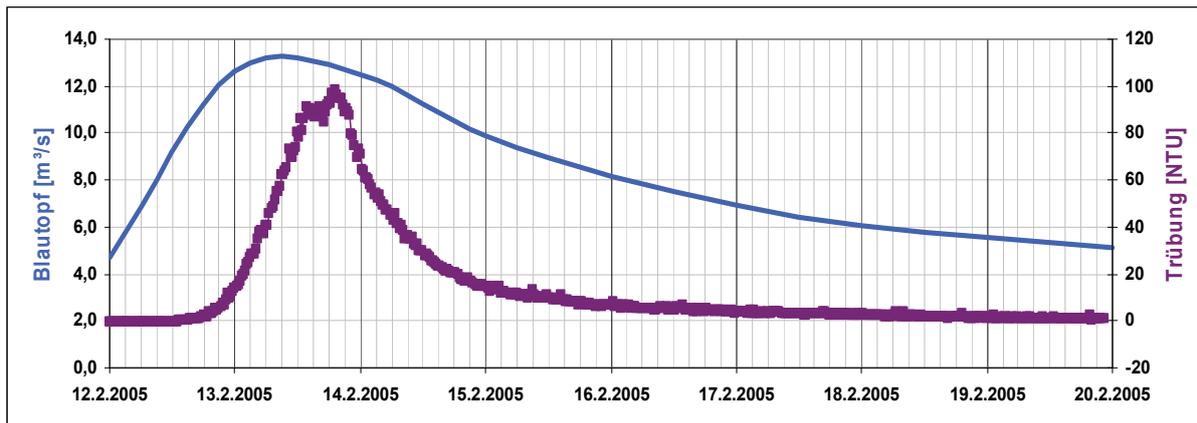


Abb. 4: Verlauf der Trübungs-Kurve (Messung durch die ARGE Blautopf) während eines Abflussereignisses im Februar 2005.

handelt es sich um den so genannten *Piston Flow Effect*. Letzterer bewirkt, dass älteres, bereits gespeichertes Grundwasser aus dem System durch sukzessiv nachfließendes neues Wasser herausgedrückt/verdrängt wird. Somit handelt es sich beim *Piston Flow* um eine reine Druckreaktion. Dabei verzögert sich die Ankunft von neu gebildetem Grundwasser gegenüber dieser Druckreaktion um 1–2 Tage. Dies belegen kontinuierliche Aufzeichnungen von Temperatur und elektrischer Leitfähigkeit, die von der ARGE Blautopf in den Jahren 2004 und 2005 durchgeführt wurden. In Abb. 5 sind die Reaktionen der beiden Parameter während zweier Schüttungsereignisse zusammen mit der jeweiligen Abflussganglinie dargestellt. Beide Parameter lassen den Direktabfluss erkennen, d. h. den Schüttungsanteil, der aus dem kurz zuvor erfolgten Neubildungsereignis resultiert und sich schon nach wenigen Tagen an der Quelle bemerkbar macht (vgl. SELG et al. 2006). Und beide Parameter zeigen die genannte Verzögerung gegenüber der Reaktion des Abflusses.

Damit lässt sich für den Transport der schnell abfließenden Komponente von der Neubildung bis zum Vorfluter ein Zeitraum von insgesamt 3 bis 4 Tagen nachweisen. Legt man eine mittlere Fließdistanz von 10 km für das Blautopf-Einzugsgebiet zu Grunde, dann errechnen sich Abstandsgeschwindigkeiten von 100–140 m/h. Das entspricht recht genau den bei Markie-

rungsversuchen gemessenen Abstandsgeschwindigkeiten (s. Kap. 6). Da der Anteil dieser schnellen Grundwasser-Komponente am gesamten Ereignisabfluss aber eher untergeordnet ist, ist primär die reine Druckreaktion für das rasche Ansteigen der Schüttung verantwortlich. Dahinter dürfte die Tatsache stehen, dass auf einer großen Fläche Grundwasser eingetragen wird, der Abfluss jedoch durch den relativ engen Querschnitt am Vorfluter erfolgt.

Der Abfluss in Folge eines Neubildungsereignisses entspricht mengenmäßig etwa knapp der Hälfte des Neubildungsvolumens (ARMBRUSTER & SELG 2006). Dies gilt unabhängig von Umfang und Intensität der Neubildung. Ungeachtet aller Randbedingungen sind speicher- und abflusswirksamer Anteil einer Neubildung offenbar immer weitgehend gleich. Der Grundwasserspeicher ist demnach im Rahmen der stattfindenden Neubildung unbegrenzt aufnahmefähig.

Die Untersuchung des Leerlaufverhaltens des Blautopfs zeigt, dass es sich keineswegs um einen Einzelspeicher handelt, dessen Schüttungsgang von MAILLET (1905) mathematisch beschrieben wurde. Es müssen vielmehr zahlreiche Einzelspeicher angenommen werden, die entsprechend ihrer abnehmenden Durchlässigkeiten sukzessive leer laufen und somit zeitlich differenziert und in unterschiedlichem Ausmaß zur Schüttung beitragen.

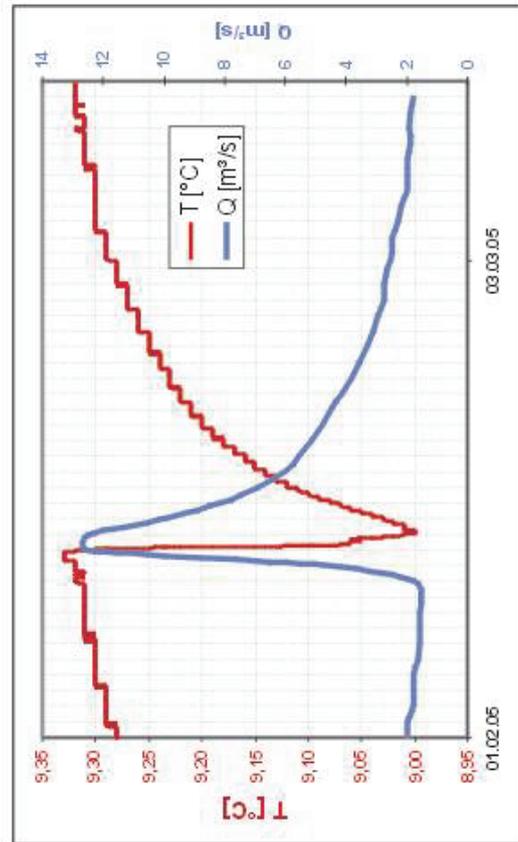
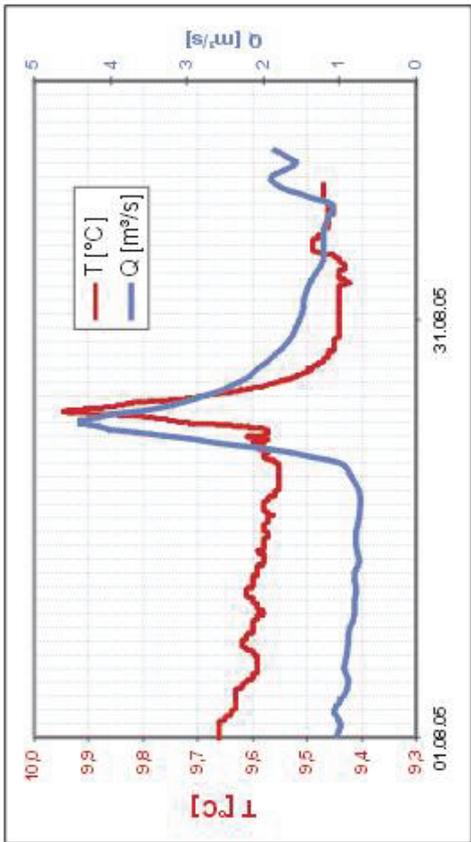
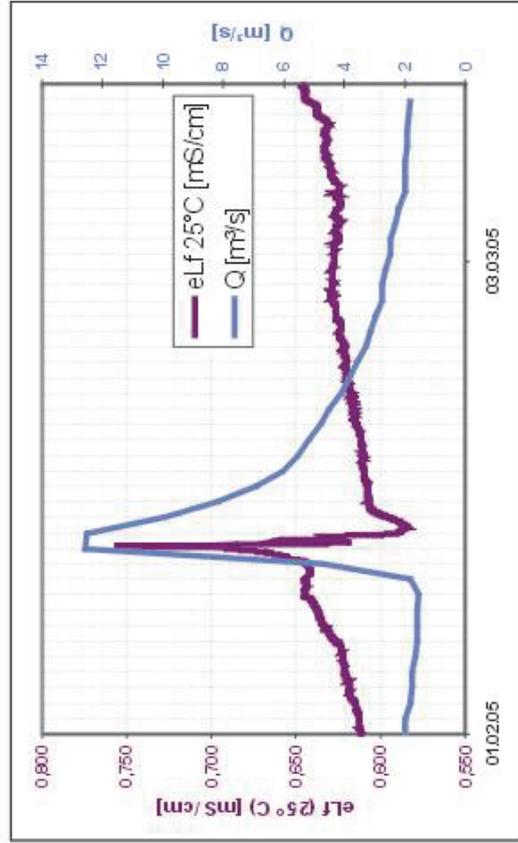
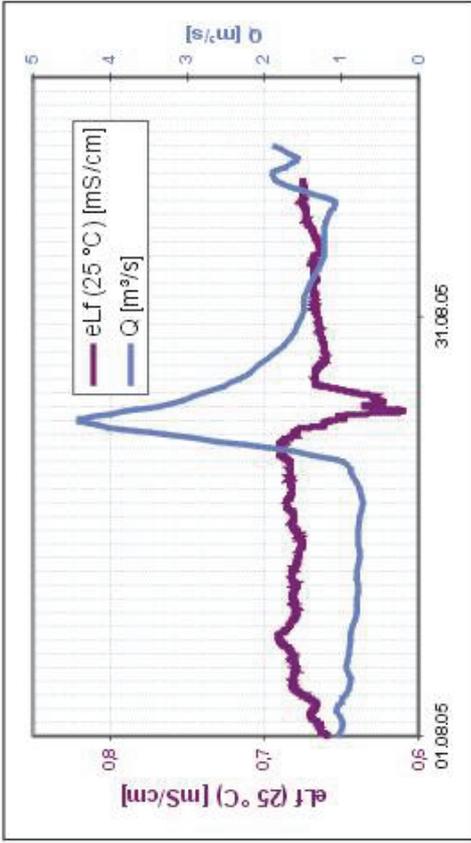


Abb. 5: Vergleich von Temperatur und elektrischer Leitfähigkeit mit der Schüttung des Blautopfs während einem Sommer-Ereignis (oben) und einem Winter-Ereignis (unten). Es ist deutlich erkennbar, dass beide Parameter mit 1-2 Tagen Verzögerung gegenüber dem Schüttungs-Anstieg reagieren (1 Skalenteil = 1 d). Näheres hierzu auch in SELG et al. 2006).

Aus der Mittleren Verweilzeit (s. u.) lässt sich ableiten, dass dabei Speicher existieren müssen, deren Leerlaufkoeffizient sehr klein ist. Diese Speicher zeichnen sich durch eine große Speicherkapazität bzw. Porosität und gleichzeitig geringe Durchlässigkeiten aus (SELG 2008).

6 Markierungsversuche

Praktisch alle Markierungsversuche auf der Schwäbischen Alb wurden durchgeführt, um die Frage von hydraulischen Verbindungen zu prüfen. Im Fall des Blautopfs sind sie daher primär für die Abgrenzung seines Einzugsgebiets von größtem Nutzen (Kap. 3.1). Weiterführende Auswertungen müssen mit großer Vorsicht erfolgen, da viele Versuche dafür nur eingeschränkt oder überhaupt nicht geeignet sind. Hierzu gehören die nicht ganz freiwilligen Versuche mit Löschwasser und Fruchtsaft, ebenso wie diejenigen, bei denen die Beobachtung zu spät begann und der erste positive Wert bereits der höchsten Tracer-Konzentration entsprach (vgl. Tab. 1). Vollständig beobachtete Durchgänge sind auch nicht die Regel. So stellen Versuche, für die eine

maximale und eine dominierende Abstandsgeschwindigkeit angegeben werden kann, bereits ein gewisses „Optimum“ dar. Aber auch dabei bestehen noch Unterschiede, wie beispielsweise der verwendete Tracer, die Menge an Vor- und Nachspülung oder den hydraulischen Verhältnissen im Aquifer zum Versuchszeitpunkt und vieles mehr.

Von den in Tab. 1 aufgelisteten Versuchen Nr. 1–5 (Versuche vor 1960) wurden die Versuchsergebnisse aus VILLINGER (1978) übernommen. Teilweise wurden nur visuelle Beobachtungen vorgenommen, in anderen Fällen stammt die Auswertung von unterschiedlichen, bei VILLINGER zitierten Autoren. In allen Fällen liegen keine verlässlichen Einzeldaten mehr vor, die eine eigene Auswertung erlauben würden. Die Proben der Versuche ab 1960 wurden am damaligen Geologischen Landesamt B.-W. analysiert, allerdings wurde die Beobachtungsdauer immer zu kurz angesetzt (max. 10 Tage). Erst die Versuche ab 1986 haben eine ausreichend lange und dichte Beprobung, um brauchbare Durchgangskurven zu erhalten.

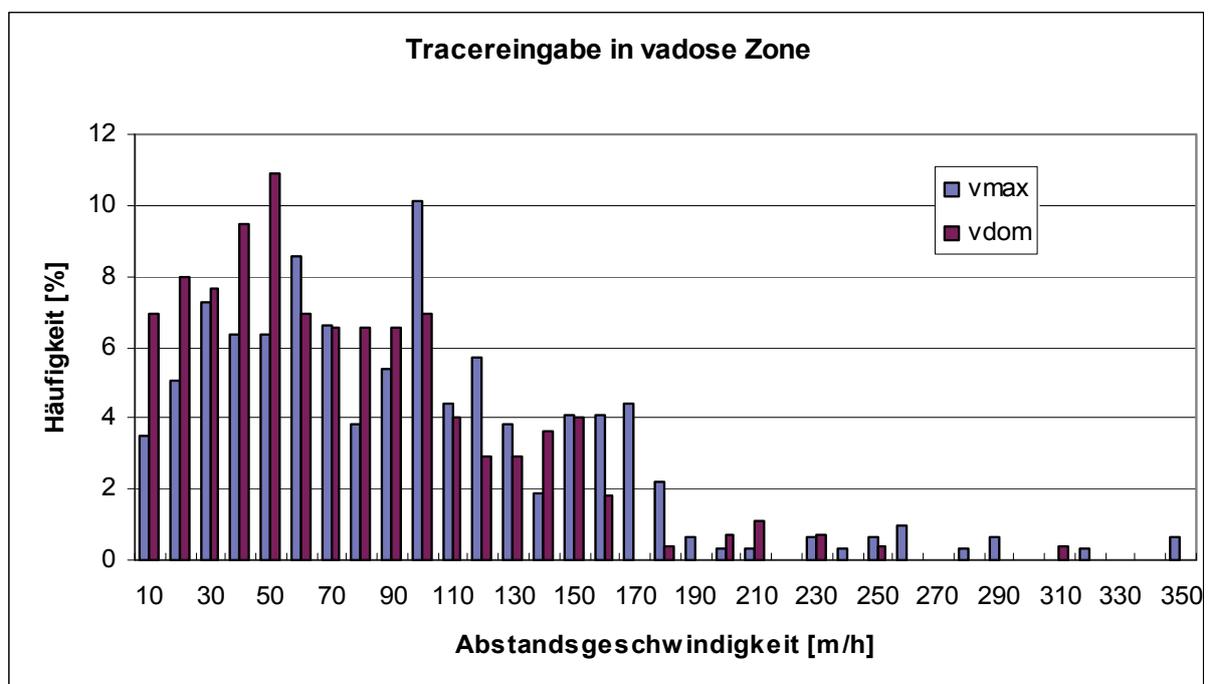


Abb. 6: Abstandsgeschwindigkeiten der Markierungsversuch im Oberjura der Schwäbischen Alb (n=316 für v_{max}, Mittelwert 94 m/h, und n=275 für v_{dom}, Mittelwert 75 m/h).

Für die Markierungsversuche wurden in der Hauptsache Dolinen, gelegentlich mit Abwasserversickerung, Karstspalten oder eigens angelegte Schürfgruben als Eingabestellen genutzt, für die ein gutes Schluckvermögen nachgewiesen war. Bei den Färbversuchen im Einzugsgebiet des Blautopfs erfolgte mit einer Ausnahme (Ifd. Nr. 19, Tab. 1) somit die Eingabe in die ungesättigte Zone. Alle Versuche nutzten somit ausschließlich gut durchlässige Karststrukturen, in denen das Wasser ungehindert dem Blautopf zufließen konnte. Die Versuche haben daher nur für das Karstsystem Bedeutung, da andere Wegsamkeiten nicht oder zumindest nicht in signifikanter Weise tangiert waren.

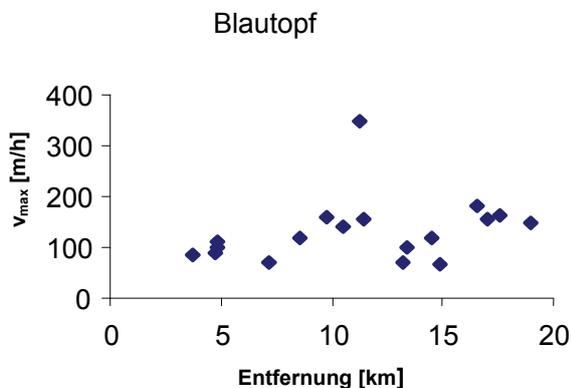


Abb. 7: Maximale Abstandsgeschwindigkeit und Entfernung. Die gleichbleibend hohen Geschwindigkeiten bei großen Entfernungen der Eingabestelle vom Blautopf deuten auf ein flächendeckend entwickeltes Karstsystem mit hoch wirksamen Leiterbahnen. Die ungewöhnlich große Geschwindigkeit von 350 m/h wurde bei der mit Abstand höchsten Schüttung während eines Versuchs gemessen (12,8 m³/s, vgl. Abb. 8).

Für 17 Versuche und ihren Tracerdurchgang im Blautopf lassen sich Mittelwerte für die max. Abstandsgeschwindigkeit mit 131 m/h (67 bis 350 m/h) und die dominierende Abstandsgeschwindigkeit mit 110 m/h (62 bis 310 m/h) bestimmen. Der Unterschied zwischen maximaler und dominierender Abstandsgeschwindigkeit, ein Effekt der Dispersion, ist damit weit geringer als in Porengrundwasserleitern. Letztere zeigen nach eigenen, unveröffentlichten Untersuchungen eine maximale Abstandsgeschwindigkeit, die ca. drei- bis viermal hö-

her ist als die dominierende. Dies spricht dafür, dass der Transport des Tracers im Einzugsgebiet des Blautopfs ganz wesentlich auf sehr gut durchlässigen Strukturen erfolgt, die von weit geringer durchlässigen Bereichen umgeben sind. Während für alle Markierungsversuche im Oberjura der Schwäbischen Alb der Korrelationskoeffizient für die Wertepaare aus dominierender und maximaler Abstandsgeschwindigkeit ($r = 0,89$) schon einen sehr engen Zusammenhang widerspiegelt (Abb. 10), ist er im Fall des Blautopfs noch deutlich größer ($r = 0,98$).

Nach JAKOWSKI (1994) ist die longitudinale Dispersivität α_L im Oberjura-Karst nirgends geringer als im Blautopf-Einzugsgebiet. Die Auswertungen von VILLINGER & UFRICHT (1989) ergaben Werte zwischen 12,4 und 38,1 m; im Mittel betrug $\alpha_L = 25,6$ m und zeigte die bekannte Entfernungsabhängigkeit. Dies entspricht einer mittleren longitudinalen Dispersion $D_L = 0,415$ m²/s (Einzelwerte zwischen 0,108 und 0,714 m²/s).

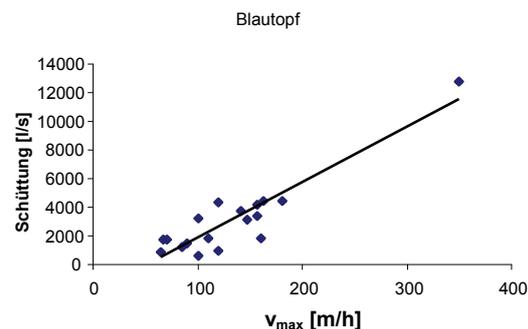


Abb. 8: Korrelation von maximaler Abstandsgeschwindigkeit und Schüttung ($r=0,93$).

Die angegebenen Abstandsgeschwindigkeiten des Blautopf Einzugsgebietes liegen im oberen Bereich der Markierungsversuche auf der Schwäbischen Alb (Abb. 6). Die hohen Geschwindigkeiten werden unabhängig davon gemessen, ob die Eingabe nahe beim Blautopf oder weit entfernt davon erfolgte (Abb. 7). Das Karstsystem mit seiner guten Drainagewirkung ist offenbar großflächig verbreitet. Geschwindigkeiten über 180 m/h sind selten und wurden beim Blautopf auch nur in einem Versuch beobachtet. Sie werden auf besonders gut leitende Karstbahnen zurückgeführt, in denen sich die Dispersion offenbar nur in geringem Maß auswirkt.

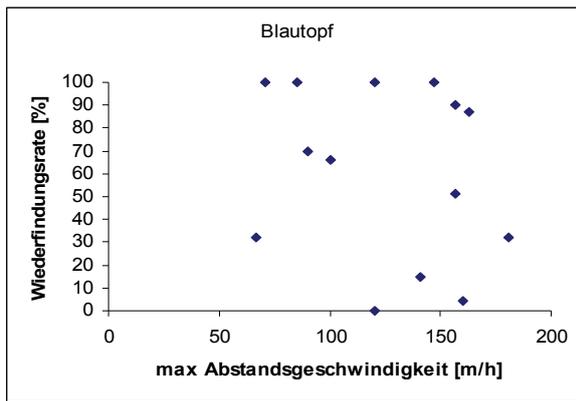


Abb. 9: Es besteht offenbar kein Zusammenhang zwischen Abstandsgeschwindigkeit und Wiederfindungsrate.

Nach Abb. 8 besteht offenbar ein Zusammenhang zwischen Abstandsgeschwindigkeit und Schüttung. Die gute Korrelation ($r = 0,93$) wird in diesem Fall aber stark beeinflusst von dem genannten „Ausreißer“ (350 m/h bei 12,8 m³/s). Ohne dieses Wertepaar läge der Korrelationskoeffizient bei nur 0,72. Darüber hinaus gibt es im Bereich der Alb nur wenige Quellen mit den nötigen Voraussetzungen (größere Anzahl Markierungsversuche, Abflussmessungen), um diesen Zusammenhang näher untersuchen

zu können. Lediglich bei der Gallusquelle zeichnet sich ein ähnlicher Zusammenhang wie beim Blautopf ab. In den Fällen, in denen dies nicht der Fall zu sein scheint (Ostalb: Pfefferquelle, Brenzquelle, Buchbrunnen) fehlen bislang auch genaue Analysen aller Randbedingungen.

Es lässt sich kein Zusammenhang zwischen der Wiederfindungsrate und der maximalen Abstandsgeschwindigkeit erkennen (Abb 9). Ebenso wenig besteht eine Abhängigkeit der maximalen Tracerkonzentration von der Höhe der Schüttung, auch dann nicht, wenn man die maximale Konzentration in Relation zur verwendeten Tracermenge setzt. Bei allen diesen Betrachtungen ist die Datenlage beim Blautopf besser als bei allen anderen Quellen der Schwäbischen Alb. Allerdings ist die Größe der Stichprobe aus statistischer Sicht immer zu klein. Viel Ausschlag gebender ist aber, dass eine Fülle von Randbedingungen unzureichend oder gar nicht bekannt ist. Somit erscheinen die Fließwege von den unterschiedlichen Eingabestellen hin zum Blautopf weitestgehend als Terra incognita.

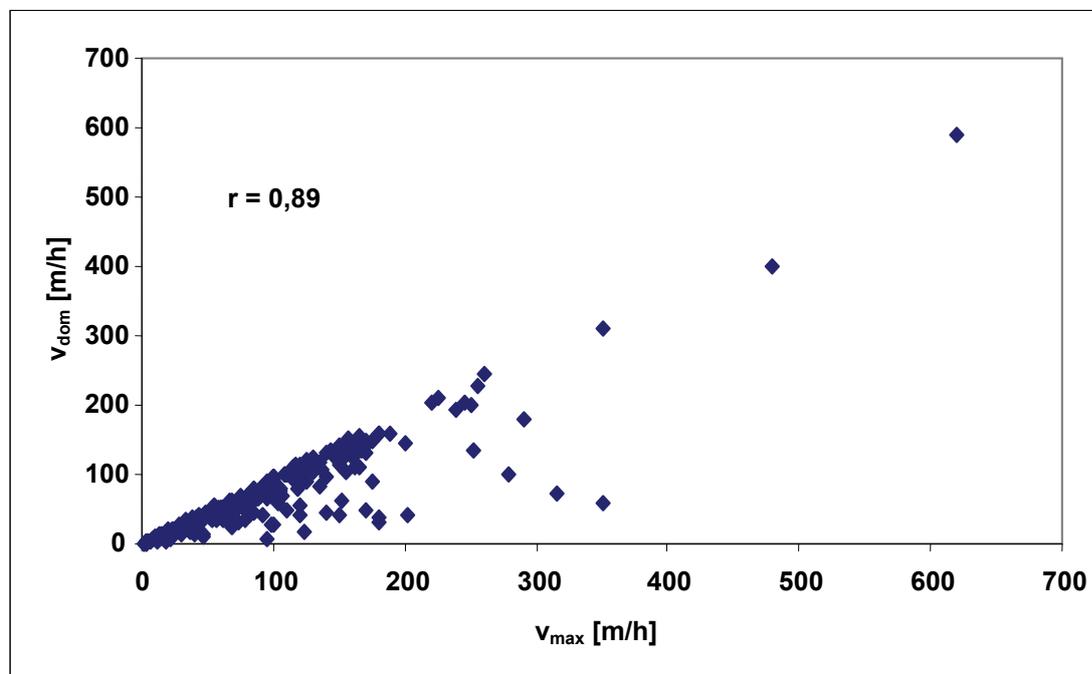


Abb. 10: Bei den Markierungsversuchen im Oberjura der Schwäbischen Alb besteht ein enger Zusammenhang zwischen der maximalen und der dominierenden Abstandsgeschwindigkeit. Im Fall des Blautopfs liegt der Korrelationskoeffizient mit $r = 0,98$ noch deutlich höher. Dispersive Effekte halten sich demnach im Karstsystem in engen Grenzen.

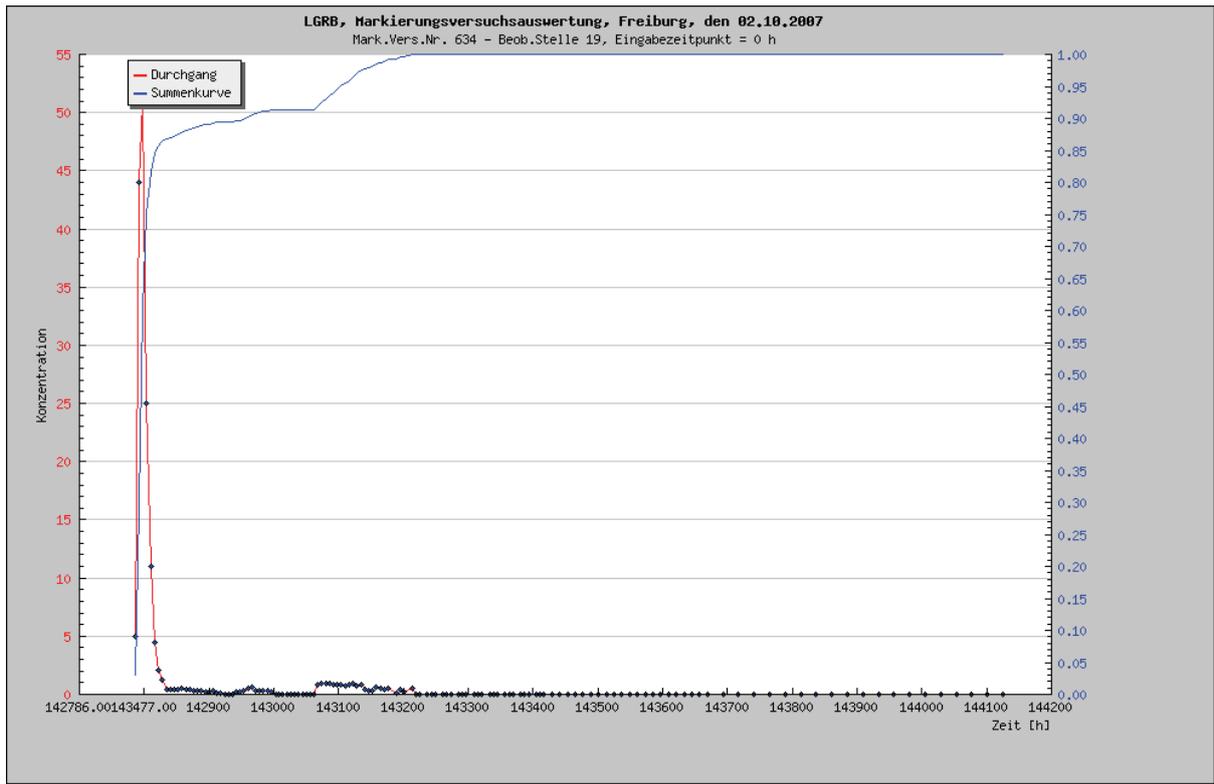


Abb. 11: Typische Durchgangskurve eines Markierungsversuchs im Blautopf (lfd. Nr. 13 in Tab.1)

7 Altersstruktur und Mittlere Verweilzeit des Grundwassers

Das Grundwasser aus dem Blautopf-Einzugsgebiet lässt sich in drei Komponenten untergliedern, die sich bezüglich ihrer Aufenthaltsdauer im Untergrund unterscheiden. Es handelt sich um:

- den Direktabfluss, charakterisiert durch geringe Aufenthaltszeit (Stunden bis einige Tage)
- Junges Grundwasser mit einer MVZ von 10–15 Jahren und
- Altes Grundwasser, das vor 1953 neu gebildet wurde.

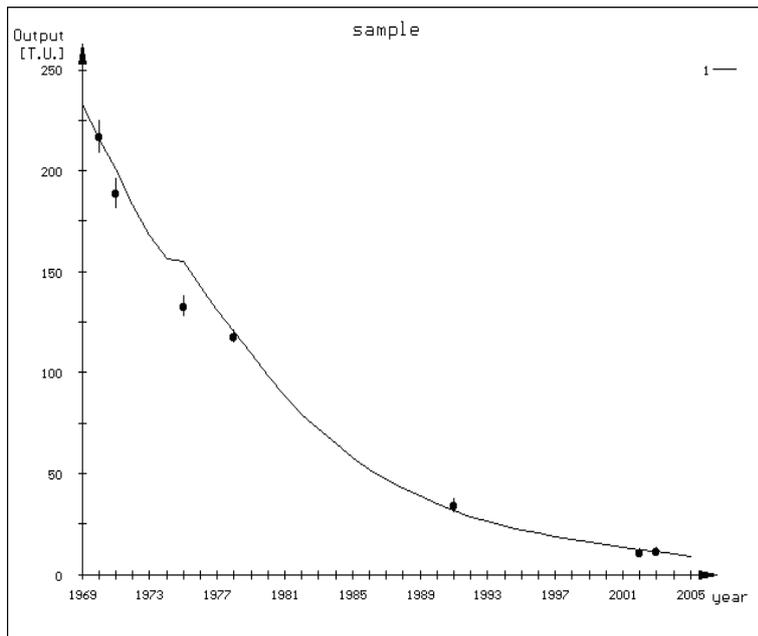
Zum **Direktabfluss**: Neubildung, die direkt in Karststrukturen (z. B. Dolinen) oder in deren unmittelbarer Umgebung erfolgt, wird sich ganz oder überwiegend in diesen Strukturen bis zur Vorflut bewegen. Die sich dabei ergebenden Fließgeschwindigkeiten sind hoch und entsprechen denen, die bei Markierungsversuchen ermittelt wurden, da

diese Versuche eben solche Strukturen nutzen. Die Dispersion ist dabei gering, dies belegen ebenfalls die Markierungsversuche. Demzufolge erreicht diese Komponente den Blautopf schnell und ihr Austrag ist zeitlich eng begrenzt. Letzteres lässt sich anhand von Temperatur- und Leitfähigkeitsmessungen nachweisen. Im Sommer ist diese direkt abfließende Komponente durch einen deutlichen Temperatur-Peak markiert. Im Winter steigt die elektrische Leitfähigkeit drastisch an, wahrscheinlich infolge der Straßensalzung (SELG et al. 2006; s. auch Abb. 5). Dieser Direktabfluss ist auf Zeiten von Neubildungs- bzw. Abflussereignissen beschränkt. Sein Anteil an der Blautopf-Schüttung liegt im Prozentbereich. Bestätigt werden diese Befunde durch die Arbeit von SCHWARZ (2008). Gehalte von Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) im Grundwasser des Blautopfs sind vor allem während Schüttungsereignissen erhöht. Sie erreichen aber bei weitem nicht die PAK-Gehalte, die über den atmosphärischen Eintrag (z.B. Niederschlag) in das Gebiet gelangen. PAK werden weitestgehend im Bo-

den gespeichert und nur minimal vom Sickerwasser weiter transportiert.

Den mengenmäßig größten Anteil an der Blautopf-Schüttung hat **Junges Grundwasser**, das per Konvention durch anthropogene Tritium-Gehalte und damit einer Neubildung nach 1953 charakterisiert ist. Etwa 80 % entfallen auf diese Kompo-

nente. Wie bereits in Kap. 2 erläutert, haben bereits GEYH & GROSCHOPF (1978) basierend auf den Tritium-Gehalten Mittlere Verweilzeiten (10 a) berechnet. Neuere Untersuchungen auf verbesserter Datenbasis (SELG et al. 2005, BAUER & SELG 2006) haben die Ergebnisse ebenso bestätigt wie die Alters-



Datum	Tritium [TU]
01.11.68	247,0
15.04.70	217,0
20.09.71	189,0
15.10.75	133,0
15.09.78	118,5 ± 2,9
23.09.91	34,2
21.02.02	11,5 ± 1,2
22.03.02	8,8 ± 1,1
12.04.02	10,8 ± 1,2
17.05.02	11,4 ± 1,0
21.06.02	10,4 ± 0,8
19.07.02	11,1 ± 1,1
10.08.02	10,7 ± 0,9
11.09.02	11,7 ± 1,2
15.11.02	10,8 ± 1,6
16.12.02	12,3 ± 0,9
10.01.03	11,5 ± 1,1
05.02.03	11,8 ± 0,9

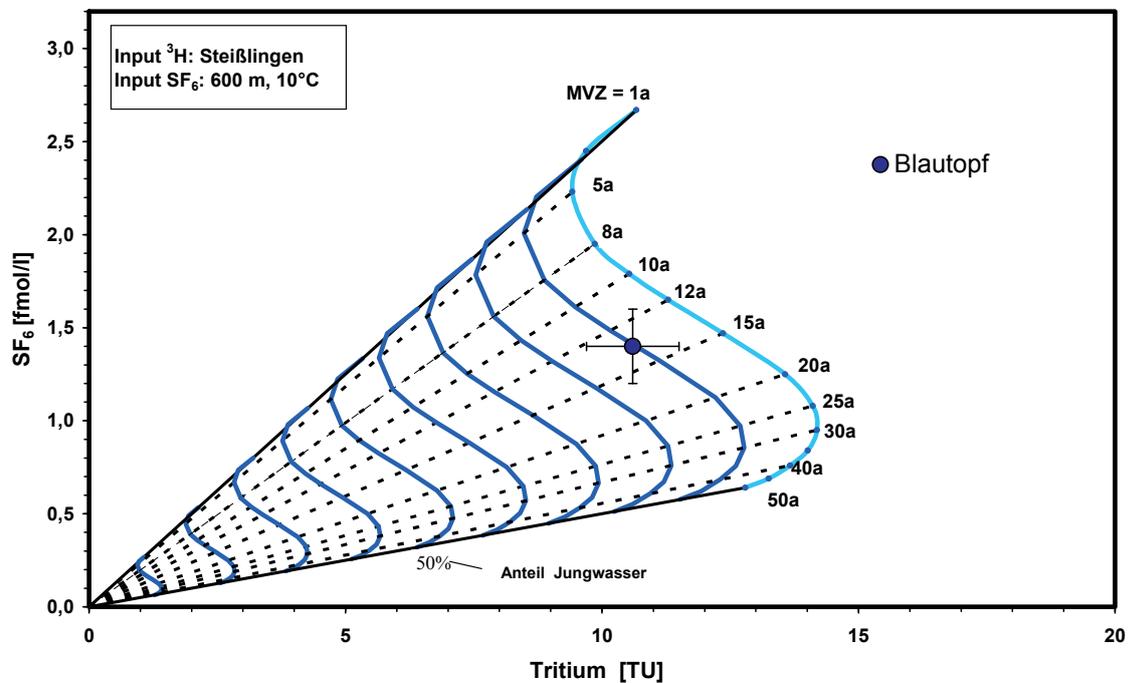


Abb. 12: Oben: Modellierung der Alterstruktur und der MVZ des Jungwassers auf Basis der vorliegenden Tritiumdaten seit 1968. Ergebnis: MVZ ca. 13 a, 20 % altes Grundwasser (aus BAUER & SELG 2006). Unten: Modellierung auf der Basis von SF₆ und Tritium ergibt ein ähnliches Ergebnis (aus SELG 2008).

modellierung mittels Schwefelhexafluorid (SF_6) und Tritium (SELG 2008). Der SF_6 -Gehalt von $1,4 \pm 0,2 \text{ fmol/l}$ ist gegenüber aktuell neu gebildetem Grundwasser deutlich abgereichert. Zusammen mit dem gemessenen Tritium-Gehalt (August 2006, Hydroisotop GmbH, Schweitenkirchen) von $10,6 \pm 0,9 \text{ TU}$ lässt sich demnach eine Mittlere Verweilzeit von 10–15 a für diese (Haupt-)Komponente ableiten (Abb. 12).

Für die Altersmodellierung mit den Tritium-Daten wurde auf die gängigen Black-Box-Modelle zurückgegriffen und das Exponential-Modell als das geeignete ausgewählt. Die Kurven-Anpassung an die vorhandene Tritium-Zeitreihe lässt sich dabei durch die Vorgabe eines weiteren Parameters, dem tritium-freien, **alten Grundwasser** optimieren. Durch schrittweise Erhöhung eines Anteils tritiumfreien Grundwassers wurde bei ca. 20 % altem Grundwasser die optimale Kurven-Anpassung erreicht (BAUER & SELG

2006). Auch die Altersmodellierung mit SF_6 und Tritium führt zu einem ähnlichen Ergebnis (10 % altes Grundwasser, Abb. 12). Als Gas-Tracer birgt SF_6 die Gefahr, dass in der mächtigen Sickerwasserzone des Blautopf-Einzugsgebiets auch nach Beginn der Untergrundpassage ein Austausch mit den atmosphärischen Gehalten stattfindet. Unterstellt man daher eine mögliche Überhöhung des SF_6 -Gehalts, wäre auch ein etwas höherer Gehalt an altem Grundwasser anzunehmen, allerdings bei gleichzeitiger Erhöhung der MVZ für das junge Grundwasser.

Hinweise auf Verdunstungseffekte lassen sich auf der Basis von $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^2\text{H}$ -Messungen aber nicht nachweisen, weder im Wasser des Blautopfs, noch in den Sickerwässern aus Höhlen im Einzugsgebiet (SCHWARZ 2008). Abb. 13 zeigt, dass alle Wertepaare auf einer Niederschlagsgeraden liegen.

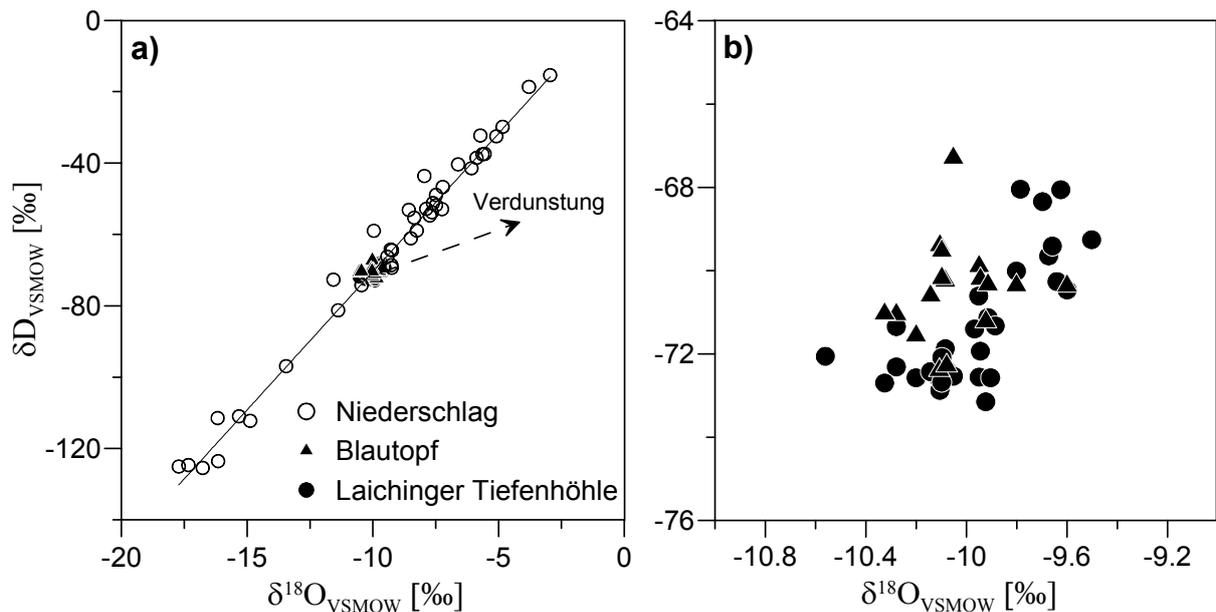


Abb. 13: a) zeigt die Niederschlagsgerade im Einzugsgebiet des Blautopfs. b) ist eine vergrößerte Darstellung der Proben aus den Höhlen und dem Blautopf.

Insgesamt ergibt sich somit unter Berücksichtigung aller methodischen Fehlertoleranzen für die Alterstruktur ein konsistentes Bild mit Aufenthaltszeiten des Grundwassers im Untergrund, die deutlich höher sind

als es der karsttypische Schüttungsgang nahe legt.

Bestätigt werden diese Ergebnisse durch die Gehalte des Pflanzenschutzmittels (PSM) Atrazin und dessen Abbauprodukt Desethylatrazin. Diese Stoffe wurden im

Oberjura-Grundwasser der Schwäbischen Alb und damit auch im Blautopf nachgewiesen (GIESSL 1988, GIESSL & HURLE 1984). Der Wirkstoff Atrazin wurde 1988 in Was-

serschutzgebieten und 1991 generell verboten, lässt sich aber noch in jüngster Vergangenheit im Blautopf wie auch in vielen anderen Quellen und Brunnen nachweisen.

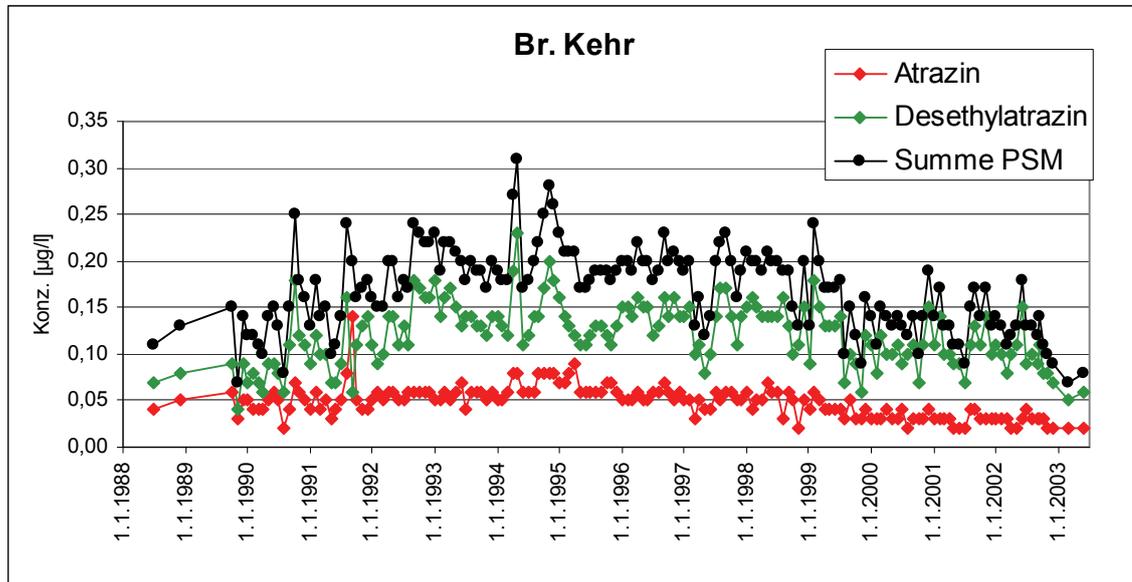


Abb. 14: Der Brunnen Kehr der Stadt Erbach ist einer der am besten untersuchten Brunnen bezüglich PSM-Gehalte. Deutlich erkennbar ist der auch nach dem Atrazinverbot von 1991 anhaltende Anstieg der Konzentrationen im Grundwasser (vgl. BAUER et al. 2005).

Aufschlussreich ist in diesem Zusammenhang die zeitliche Entwicklung der PSM-Gehalte im Grundwasser. Das Atrazinverbot wirkte sich nicht unmittelbar aus, sondern erst mit einer Verzögerung von mehreren Jahren (Abb. 14). Im Sinne der für die Altersmodellierung zur Verfügung stehenden Black-Box-Modelle erscheint daher das Exponentialmodell alleine nicht ausreichend, bzw. es zeichnet sich ein weiterer Effekt ab, der für den Stofftransport im Untergrund relevant ist. Nur mit der Annahme einer Piston-Flow-Komponente lässt sich die zeitliche Verschiebung des PSM-Maximums im Grundwasser gegenüber dem Anwendungsverbot nachbilden.

Auch der zeitlich variable Austrag von PAK wird damit nachvollziehbar. Er ist stark an Ereignisse mit hohen Abflussraten gebunden (ca. 60-70%, SCHWARZ 2008) und wird als Druckreaktion interpretiert, ausgelöst durch neu in den Untergrund eingetragenes Niederschlagswasser. Hierin unterscheidet sich das Grundwasser nicht vom Sicker-

wasser. Die vadoso Zone muss daher für die Fließdynamik im Einzugsgebiet des Blautopfs eine wichtige Rolle spielen.

8 Charakterisierung des Grundwasserleiters

8.1 Porosität und Durchlässigkeit

Generell sind im Oberjura für die Grundwasserführung zwei Wegsamkeiten bedeutend: die Klüfte bzw. das Kluffnetz mit normalen Kluffweiten wie in vielen Festgesteinen, und die größeren Karsthohlräume. Während in den Klüften das Grundwasser laminar fließt, ist in den Karstspalten ab Öffnungsweiten von ca. 1 cm turbulentes Fließen möglich. Eine eingehende Darstellung hierzu findet sich in DREYBRODT (1988). Hinzu kommt die sekundäre Matrixporosität der Lochfelsfazies (STOBER 1984, BERTLEFF 1986, WELDER 1991, KAPPES et al. 2007).

In der Schichtenfolge des Einzugsgebiets gibt es sowohl vertikale als auch laterale Wechsel von Mergeln und Kalksteinen, Bank- und Massenkalken, verkarsteten und nicht verkarsteten Bereichen. Diese petrographischen Heterogenitäten finden ihren Niederschlag in den Aquifereigenschaften und bedingen einen ausgesprochen inhomogenen, anisotropen Aquifer. Eine wesentliche Ursache hierfür dürfte die unterschiedlich starke Klüftung in den Bank- und Massenkalken sein. Die theoretisch zu erwartende stärkere Klüftung in den Bankkalken müsste eine geringere Verkarstung zur Folge haben, da das Lösungswasser diffus verteilt in das Gestein eintritt (vgl. DREYBRODT 1988, FORD & WILLIAMS 1989). Tatsächlich zeigt die Erfahrung aus der Wassererschließung jedoch, dass in Massenkalken bessere Ergiebigkeiten erzielt werden. Für ein repräsentatives Elementarvolumen muss man daher sicherlich von Kantenlängen in der Größenordnung von 10^2 bis 10^3 m oder mehr ausgehen. Weitere Ursachen für eine unterschiedliche Klüftung stellen ungleiche tektonische Beanspruchung und unterschiedliche Kompetenz der Schichtglieder dar.

Die in der numerischen Modelltechnik verwendete bestmögliche Approximation dieser komplexen Verhältnisse ist der Doppelkontinuum-Ansatz (z. B. TEUTSCH 1988; SAUTER 1992, 1995; LANG 1995). Dabei werden zwei Systeme angenommen, ein hoch und ein gering durchlässiges, diesen beiden werden eigene Durchlässigkeitsbeiwerte und Speicherkoeffizienten zugeordnet. Über einen Austauschterm wird die hydraulische Kommunikation beider Systeme simuliert. Dem hoch durchlässigen System entsprechen die Karststrukturen, das gering durchlässige System repräsentiert die Klüfte. Die Matrixporosität dürfte je nach Ausbildung dem einen oder dem anderen System zugehören. Diese modelltechnische Approximation ist allerdings eine überaus starke Vereinfachung der tatsächlichen Verhältnisse, wie das Leerlaufverhalten des Blautopfs zeigt.

Man geht davon aus, dass das Karstsystem nur einen geringen Anteil an der effektiven Porosität darstellt (vgl. TEUTSCH 1988, SAUTER 1992). Es leistet aber auch aufgrund der dort gegebenen hohen Fließgeschwin-

digkeiten keinen nennenswerten Beitrag zu einer längerfristigen Speicherung von Grundwasser. Dies erfolgt zum einen im Kluftsystem, das allerdings unter Annahme realistischer Basisgrößen (Kluftdichte und Öffnungsweite) nicht wesentlich mehr als 1 % Porosität bereitstellen kann (SELG 2008). Sehr viel größere Porositäten können der Matrixporosität der Lochfelsfazies zugeschrieben werden (im Mittel 5-10 %, z. T. auch mehr, vgl. KAPPES et al. 2007). Eine Abschätzung der effektiven Porosität über die Grundwasserneubildung, die Mittlere Verweilzeit und das Aquifervolumen führt zu Ergebnissen von ca. 9-10 % (SELG 2008). Demnach müsste im Lochfels die wesentliche Speicherung des Grundwassers erfolgen und die Klüfte würden eine nur untergeordnete Rolle spielen. Im Einzugsgebiet des Blautopfs liegt die Lochfelsfazies allerdings ganz überwiegend in der ungesättigten Zone (Abb. 2). Dass diese Zone eine wichtige Rolle spielt, dafür gibt es weitere Hinweise (vgl. Kap. 8.2).

Aus dem Einzugsgebiet des Blautopfs gibt es keine hydraulischen Kennwerte, die aus entsprechenden Tests abgeleitet sind. Gäbe es solche Tests, so würden ihre Ergebnisse mit großer Wahrscheinlichkeit in weiten Grenzen streuen. In aller Regel ist damit weder eine räumliche Diskretisierung möglich, noch die Frage zu beantworten, welcher Wert als repräsentativ einzustufen wäre. Über die Porengeschwindigkeit lässt sich aber zumindest ein Gebietswert für die Gebirgsdurchlässigkeit abschätzen, sie liegt demnach bei $7,5 \cdot 10^{-5}$ m/s (SELG 2008).

8.2 Die vadose Zone und ihre Bedeutung für den Grundwasserumsatz

Praktisch alle hydrogeologischen Ansätze und Methoden beziehen sich auf den Aquifer, d. h. die gesättigte Zone des Grundwasserleiters. Dagegen bleibt die ungesättigte Zone in aller Regel unberücksichtigt. Für das Einzugsgebiet des Blautopfs wurde bereits erläutert, dass die ungesättigte Zone mit 130 m doppelt so mächtig wie die gesättigte ist (Kap. 3.3). Sie ist damit ihrem Betrag nach und in Relation zur ge-

sättigten Zone ungewöhnlich mächtig. Es mehren sich die Hinweise darauf, dass in dieser Zone in großem Stil Grundwasserspeicherung stattfindet. Doch welche Faktoren (Gesteinsmatrix, feine Klüfte,...) hier die größte Rolle spielen, ist bislang noch nicht endgültig geklärt.

Neu gebildetes Grundwasser durchsickert diese Zone keineswegs rasch. Das zeigen die $\delta^{18}\text{O}$ -Gehalte von Sickerwässern, die in

Karsthöhlen beprobt wurden (SCHWARZ 2008). Von den starken Variationen in den Niederschlägen ist im Sickerwasser nichts mehr zu sehen (Abb. 15). Es kommt zu einer Homogenisierung der isotopischen Zusammensetzung auf ihrem Weg durch die ungesättigte Zone, so dass in den Höhlen-Sickerwässern ungefähr das gewichtete Mittel aus den Niederschlägen erreicht wird (ca. -10 ‰). Dieses Mittel wurde auch im Blautopf gemessen.

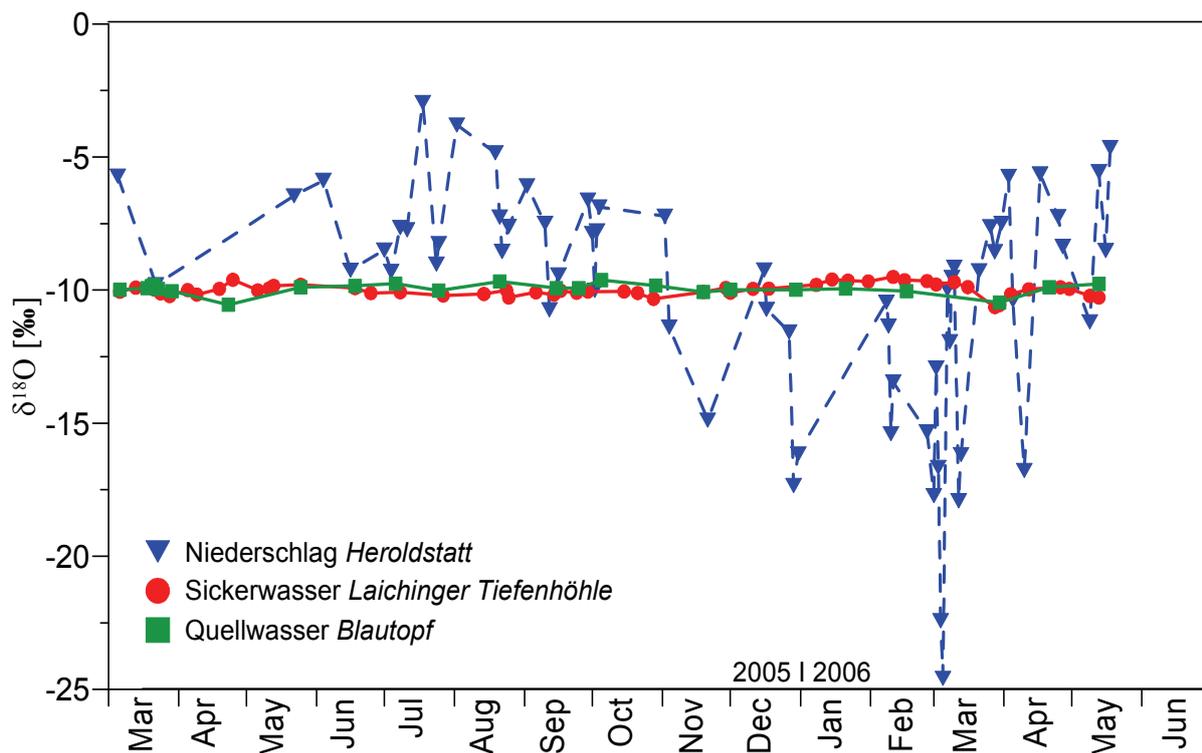


Abb. 15: Sauerstoffisotopen-Messungen für den Niederschlag, Sickerwasser in der Laichinger Tiefenhöhle und dem Blautopf.

Von allen Porositätstypen ist allein die Matrixporosität hinreichend groß, um die Grundwasserneubildung aufzunehmen und die ermittelten Verweilzeiten zu gewährleisten. Im Fall des Blautopf-Einzugsgebiets, und dies gilt auch für weite Teile der West- und Mittleren Alb, liegt die an die Massenkalk des Kimmeridge gebundene Matrixporosität über der Grundwasseroberfläche.

Die notwendige Porosität lediglich der gesättigten Zone zuzuordnen, würde zu unplausibel hohen Werten führen, insbesondere wenn dort lediglich Klüfte als Speicher zur Verfügung stehen.

Bei Abflussereignissen wird Wasser mobilisiert, das nur aus der Sickerwasserzone stammen kann (SELG et al. 2006). Dies machen Sommer-Ereignisse deutlich, die phasenweise Wasser zum Abfluss bringen, das nicht nur kälter als das warme Niederschlagswasser ist, sondern auch kälter als das Grundwasser (vgl. Abb. 5). Dies erfolgt nach dem Durchgang des Direktabflusses (Temperatur-Peak), dem ein Absinken der Temperatur unter das Ausgangsniveau folgt. Nur in der mächtigen Sickerwasserzone lässt sich eine Temperatur lokalisieren, die sowohl kälter als das Grundwasser, als auch kälter als das sommerliche Niederschlagswasser ist.



Abb. 16 Ein Höhlenbach im Bereich des Blau-Canyons, d. h. im ansonsten trockenen Teil des Höhlensystems (Photo: ARGE Blautopf/ANDREAS KÜCHA). Als die Aufnahme entstand (03.08.2008) lag die Blautopf-Schüttung bei $0,92 \text{ m}^3/\text{s}$. Ein derart geringer Abfluss bestand bereits seit mehreren Wochen, so dass Neubildungsereignisse zu dieser Zeit keinerlei Rolle gespielt haben dürften. Dennoch erhält das Karstgerinne in der vadosen Zone ganz offensichtlich größere Wassermengen und unterstreicht die Bedeutung der Sickerwasserzone als wichtigen Grundwasserspeicher.

Dank

Herrn Dipl.-Ing (FH) HARTMUT REIBER (Regierungspräsidium Tübingen) verdanken wir die Informationen über die Abflussmessungen. DR. JÜRGEN HEINZ (Hydroisotop GmbH) und DR. MICHAEL BAUER (Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau) haben in den vergangenen Jahren auf vielfältige Weise an den Untersuchungen im Oberjura mitgewirkt. Mit der ARGE Blautopf konnte das Datenlogger-Projekt verwirklicht

werden. Die Isotopenmessungen wurden vom Team um Herrn Prof. HEINRICH TAUBALD (Uni Tübingen) und CRISTINA POSTIGO durchgeführt. Für die PAK-Analysen, die im Rahmen einer Dissertation gemessen wurden, sei der Arbeitsgruppe von Prof. GRATHWOHL (Universität Tübingen), insbesondere dem Laborteam herzlich gedankt.

Allen für ihre Unterstützung ein Dankeschön.

Schriftenverzeichnis

- ARMBRUSTER, V. (2002): Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg. – Freiburger Schriften zur Hydrogeologie, **17**: 141 S., 38 Abb., 20 Tab., 3 Kartenbeil.; Freiburg.
- ARMBRUSTER, V. & SELG, M. (2006): Der Abfluss des Blautopfs im Spiegel der Grundwasserneubildung (Oberjura-Karst, Süddeutschland). – Tübinger Geow. Arbeiten, **C 98**: 4-16, 10 Abb., 1 Tab.; Tübingen.

- BAUER, M., SELG, M. & EICHINGER, L. (2002): Pflanzenschutzmittel im Kluft- und Karstgrundwasser des Oberjura - Bereich Lkr. Reutlingen. – Abh. Landesamt f. Geol., Rohst. u. Bergbau B.-W., **15**: 149-221, 39 Abb., 10 Tab.; Freiburg i. Br.
- BAUER, M. & SELG, M. (2006): Altersstruktur und Mittlere Verweilzeit im Grundwasser des Blautopfs und anderer Quellen und Brunnen im Oberjura-Karst Süddeutschlands. – Tübinger Geow. Arbeiten, **C 98**: 18-44, 6 Abb., 5 Tab.; Tübingen.
- BERTLEFF, B. (1986): Das Strömungssystem der Grundwässer im Malm-Karst des West-Teils des süddeutschen Molassebeckens. – Abh. geol. Landesamt B.-W., **12**: 1-271, 64 Abb., 15 Tab., 8 Anl.; Freiburg i. Br.
- BINDER, H. (1960): Niederschlag, Abfluß und Verdunstung im Gebiet des Blautopfs in den 35 Abflußjahren von 1925 bis 1959. – Jber. u. Mitt. oberrh. geol. Ver., NF **42**: 63-65; Stuttgart.
- DREYBRODT, W. (1988): Processes in Karst Systems. – 288 S., zahlr. Abb. u. Tab.; Berlin usw. (Springer).
- EISSELE, K. (1957): Über einige Färbversuche mit Uranin an Karstquellen der Schwäbischen Alb.- Wasser-Abwasser, **98(4)**: 84-87, 4 Abb.; München.
- FORD, D. C. & WILLIAMS, P. (1989): Karst Geomorphology and Hydrology. – 601 S.; London (Unwin).
- GEYH, M. A. & GROSCHOPF, P. (1978): Isotopenphysikalische Studie zur Karsthydrogeologie der Schwäbischen Alb. – Abh. geol. Landesamt B.-W., **8**: 7-58, 9 Abb., 5 Tab.; Freiburg.
- GISSL, H. (1988): Über das Vorkommen ausgesuchter Pflanzenschutzmittel im Wasser unter besonderer Berücksichtigung des Grundwassers. – Diss. Univ. Hohenheim; 139 S., 11 Abb., 50 Tab.; Stuttgart.
- GISSL, H. & HURLE, K. (1984): Pflanzenschutzmittel und Grundwasser: Untersuchungen zum Vorkommen des Herbizids Atrazin im Grundwasser der Schwäbischen Alb. – Agrar- und Umweltforsch. Bad. - Württ. **8**, 80 S.; Stuttgart (Ulmer).
- GRADMANN, R. (1912): Bodengestalt und Gewässer. – In: Beschreibung des Oberamts Münsingen, 2. Bearb.: 17-97; Stuttgart.
- GROSCHOPF, P. (1957): Färbversuche auf der Ulmer Alb, ihre wissenschaftliche und praktische Bedeutung. – Mitt. Ver. Naturwiss. u. Mathematik, **25**: 277-282, 1Abb.; Ulm.
- (1966): Der Färbversuch Dutzenbergschacht (Markung Nellingen, Kreis Ulm). – Mitt. Verb. Dt. Höhlen- u. Karstforsch., **12**: 7-10; München.
- HASENMAYER, J. (1984): Zum Alter der Blautopf-Unterwasserhöhle (7524/43).- Laichinger Höhlenfreund, **19** (1): 37-41; Laichingen.
- (1986): Das Geheimnis des Blautopf. – Geo, **5/1986**, 10-38; Hamburg.
- JAKOWSKI, A. (1994): Ermittlung der Dispersion und anderer hydraulischer Parameter aus Markierungsversuchen in Karst- und Kluftgrundwasserleitern Baden-Württembergs. – Diss. TH Darmstadt, 153 S., zahlreiche Abb. u. Tab.; Anhang.
- KAPPES, V. R., Rifai, H., SELG, M. & WONIK, T. (2007): Carbonate porosities and pore types determined using NMR spectroscopy on the basis of examples from the Wilsingen karst borehole (Swabian Alb). – Z. dt. Ges. Geowiss., **158(4)**: 1011-1023, 13 Abb.; Stuttgart.
- KELLER, M. (1963): Unterwasserforschung im Blautopf bei Blaubeuren. – Jh. Karst- u. Höhlenkde., **4**: 219-228; München.

- LANG, U. (1995): Simulation regionaler Strömungs- und Transportvorgänge in Karstaquiferen mit Hilfe des Doppelkontinuum-Ansatzes: Methodenentwicklung und Parameteridentifikation. – Mitt. Inst. f. Wasserbau, Univ. Stuttgart, **85**, 180 S.; Stuttgart.
- MAILLET, E. (1905): Essais d'hydraulique souterraine & fluviale. – 218 S.; Paris (A. Hermann).
- SAUTER, M. (1992): Quantification and forecasting of regional groundwater flow and transport in a karst aquifer (Gallusquelle, Malm, SW.Germany). – Tüb. Geowis. Arbeiten., **C13**, 150 S., 82 Abb., 19 Tab.; Tübingen.
- (1995): Die Rolle des Epikarsts für den Stofftransport durch Karstgrundwasserleiter – Quantifizierung des Eintrags und numerische Modellierung. – Z. dt. geol. Ges.; **146**: 263-273, 10 Abb.; Hannover.
- SCHWARZ, K. (2008): Atmogenic pollutants as reactive tracers for identification and quantification of important transport processes in a karst area at the catchment scale. – Tübinger Geowiss. Arbeiten.; Tübingen (im Druck).
- SELG, M.(2008): Speichereigenschaften des Oberjura in Süddeutschland am Beispiel des Blautopf-Einzugsgebiets. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, **52**(2): 56-65, 12 Abb., 2 Tab.; Koblenz.
- SELG, M., BAUER, M., HEINZ, J. & MAIR, C. (2005): Die Alterstruktur des Kluft- und Karstgrundwassers im Oberjura der Schwäbischen Alb und ihre Bedeutung für den anhaltenden Atrazinaustrag. – Ber. Naturf. Ges. Freiburg, **95** (1): 1-45, 23 Abb., 4 Tab.; Freiburg.
- SELG, M., SCHOPPER, M. & STRAUB, R. (2006): Kurzzeitdynamik und Direktabfluss des Blautopfs (Oberjura-Karst, Süddeutschland). – Tübinger Geow. Arbeiten, **C 98**: 45-72, 12 Abb., 1 Tab.; Tübingen.
- SIHLER, H. (1929): Blautopf und Karsthydrographie. – Jh. Ver. vaterl. Naturkde. Württ., **85**: 210-241; Stuttgart.
- STOBER, I. (1984): Strömungsverhalten in Festgesteinsaquiferen mit Hilfe von Pump- und Injektionsversuchen. – Geol. Jb., **C 42**: 3-204; Hannover.
- TEUTSCH, G. (1988): Grundwassermodelle im Karst: Praktische Ansätze am Beispiel zweier Einzugsgebiete im Tiefen und Seichten Malmkarst der Schwäbischen Alb. – Diss. Univ. Tübingen; 205 S., zahlr. Abb. und Tab., Anhang; Tübingen.
- VILLINGER, E. (1972): Seichter Karst und Tiefer Karst in der Schwäbischen Alb. – Geol. Jb., **C 2**: 153-188, 9 Abb.; Hannover.
- (1977): Über Potentialverteilung und Strömungssysteme im Karstwasser der Schwäbischen Alb (Oberer Jura, SW-Deutschland). – Geol. Jb., **C 18**: 3-93, 9 Abb., 11 Tab., 2 Taf.; Hannover.
- (1978): Zur Karsthydrologie des Blautopfs und seines Einzugsgebietes (Schwäbische Alb). – Abh. Geol. Landesamt B.-W., **8**: 59-127, 17 Abb., 14 Tab.; Freiburg i. Br.
- (1987): Die Blautopfhöhle bei Blaubeuren als Beispiel für die Entwicklung des Karstsystems im schwäbischen Malm. – Geol. Jb., **C 49**: 71-103, 8 Abb.; Hannover.
- VILLINGER, E. & UFRECHT, W. (1989): Ergebnisse neuer Markierungsversuche im Einzugsgebiet des Blautopfs (mittlere Schwäbische Alb). – Mitt. Verb. dt. Höhlen- u. Karstforscher, **35** (1/2): 25-38, 11 Abb., 2 Tab.; München.
- WELDER, W. (1991): Verkarstungserscheinungen des oberen Weißen Juras in Bohrungen entlang der Donau (Riedlingen – Donauried). – Dipl.-Arbeit Univ. Tübingen, 117, S., zahlreiche Abb., Anhang; Tübingen.



Der Blautopf bei Blaubeuren. Aufn. JOCHEN DUCKECK